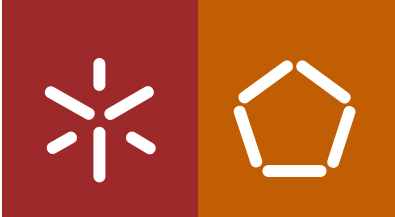




Cátia Vanessa Ferreira de Carvalho

Estudo, desenvolvimento e conceção de um sistema de aplicação de carga cíclica de um forno de vazio para soldadura por pressuring diffusion welding

Universidade do Minho  
Escola de Engenharia







Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Cátia Vanessa Ferreira de Carvalho

Estudo, desenvolvimento e conceção de um  
sistema de aplicação de carga cíclica de um  
forno de vazio para soldadura por pressuring  
diffusion welding

Tese de Mestrado  
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao  
Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Trabalho efetuado sob a orientação do  
Professor Doutor Eurico Seabra  
Professor Doutor Luís Ferreira Silva

Dezembro de 2012

# AGRADECIMENTOS

---

Quero agradecer a todas as pessoas pelo apoio, encorajamento e assistência demonstrada no desenvolvimento da minha dissertação.

Em especial gostava de agradecer à minha mãe e irmão todo o apoio e incentivo que me deram ao longo da vida académica, pois sem eles, sem o seu esforço e sem a sua ajuda monetária já mais seria possível.

Agradeço também ao João Mendanha pelo apoio incondicional que me deu ao longo deste projeto para sempre fazer mais e melhor.

Gostava também de agradecer ao meu pai, que embora tenha partido, certamente estará muito orgulhoso por ver que tive força para lidar com todas as situações com que me deparei, graças à educação que me deu e à força que me transmitiu.

Assumo publicamente a minha enorme admiração e agradecimento pelos Professores Doutores Eurico Augusto Rodrigues Seabra e Luís Fernando Sousa Ferreira Silva, agradeço por serem meus orientadores da dissertação, por me terem induzido um espírito crítico e dinâmico, e também pela disponibilidade demonstrada ao longo de todo o projeto para solucionar todo e qualquer problema.

Agradeço também ao Vítor Neto, funcionário das oficinas de formação e apoio do departamento de engenharia mecânica pela ajuda prestada e pelos conhecimentos transmitidos.

Ao meu amigo e colega de curso Edgar Gonçalves, agradeço por todo o apoio disponibilizado e pelas sugestões dadas para melhoria de aspetos do projeto realizado.

Quero prestar também um agradecimento ao colega Ricardo Portugal pela ajuda no desenvolvimento do sistema de aquisição e controlo.

Agradeço à Universidade do Minho por me ter facultado os meios necessários ao desenvolvimento dos conhecimentos e prática adquirida, e espero que este laço nunca se perca.

Termino, dedicando a minha tese a todas as pessoas anteriormente mencionadas, especialmente ao meu pai.

# RESUMO

---

Este trabalho apresenta o estudo, desenvolvimento e conceção de um sistema de aplicação de carga para um forno de vazio para soldadura por *pressuring diffusion welding*. Com este trabalho pretende-se efetuar um *upgrade* a um forno de vazio já existente.

O processo de união conduzido no estado sólido, designado por *pressuring diffusion welding* (PDW), é uma variante da soldadura por difusão (SD). Nas juntas obtidas por PDW, a força aplicadas aos materiais a ligar varia sinusoidalmente no decorrer do processo, em vez de ser mantida constante como na SD. O PDW produz juntas de elevada resistência mecânica, em virtude de promover a rotura da película de óxidos durante os instantes iniciais do processo.

Como foi referido anteriormente, pretende-se efetuar um *upgrade* a um forno de vazio já existente, que é utilizado para SD, para que efetue PDW, devendo ser capaz de aplicar cargas cíclicas de 70 N a 15 kN a uma frequência de operação de 0,5 a 5 Hz.

A execução deste trabalho levou à realização de várias fases, as quais serão descritas de seguida.

Inicialmente, tendo em conta as especificações e a ergonomia, efetuou-se o estudo e a conceção da solução mais adequada para a estrutura do forno de vazio.

Posteriormente, realizou-se uma pesquisa em torno dos componentes necessários para o sistema de aplicação de carga e sistema de medição. Esta pesquisa resultou na seleção dos componentes que se mais se adequam às especificações exigidas. Uma vez já selecionados os componentes, foi necessário montá-los na estrutura de forma correta.

De seguida, desenvolveu-se um programa no editor *LabVIEW®*, com a funcionalidade de comandar e controlar todo o equipamento. Assim, torna-se possível alterar variáveis como a força a ser aplicada e a frequência de operação.

Finalmente, realizaram-se uma série de ensaios com os quais se pretendia verificar se para uma determinada frequência e um determinado intervalo de forças é possível a carga ser aplicada de forma cíclica e sinusoidal. É importante salientar, que a altura do atuador pneumático foi um fator de grande influência nos resultados obtidos, uma vez que foi sendo alterada desde a altura normal de trabalho a 6 bar até à altura mínima de trabalho. (Anexo – A)

Com isto pretende-se obter um sistema de aplicação de carga que obedeça as especificações e garanta que a carga é aplicada de forma cíclica e sinusoidal.

# ABSTRACT

---

This essay presents the study, development and conceptions of one application charge system to a vacuum furnace to welding by pressuring diffusion welding. With essay we pretend to make upgrade in an existing vacuum furnace.

The bonding process conducted in the solid state, designated by pressuring diffusion welding (PDW) is a variant of diffusion welding (SD). PDW joints obtained, by the force applied to the materials to connect varies sinusoidally throughout the process, rather than being held constant as in SD. The PDW joints, produces high mechanical strength due to promote rupture of the oxide film during the early stages of the process.

As previously stated, is intended to make an upgrade to an existing vacuum furnace, which is used to SD that make PDW and should be capable of applying the cyclic loads of 70 N to 15 kN an operating frequency of 0.5 to 5 Hz.

The execution of this essay led to several stages, which will be described.

Initially, taking in concern the specifications and ergonomics, we performed a conception study and the most appropriate solution for the structure of the vacuum furnace.

Subsequently, a research was conducted around the system components necessary for the load application and measuring system. This research resulted in the selection of the components that best fit the specifications required. After we have selected the components, it was necessary to mount them in the structure correctly.

Then, we developed a program in *LabVIEW*® *editor* with the command and control functionality of all equipment. So, it becomes possible to change variables as the force being applied and the operating frequency.

Finally, we performed a series of tests, to which it was intended to verify for a given frequency and a given range of loading forces can be applied cyclically and sinusoidal. Importantly, the height of the pneumatic actuator was a factor of great influence on the results once that has been changed since the height of normal working hours to 6 bar minimum working height. (Annex - A)

# ÍNDICE GERAL

---

Agradecimentos .....	iii
Resumo.....	iv
Abstract .....	vi
Índice geral .....	vii
Índice de figuras .....	ix
Índice de tabelas .....	xii
Nomenclatura.....	xiii
Glossário.....	xv
1. Introdução .....	1
1.1. Objetivos .....	1
1.2. Motivação e justificação do trabalho.....	1
1.3. Estrutura da Tese .....	4
2. Conceção de um forno de vazio para soldadura por PDW .....	5
2.1. Forno existente .....	5
2.2. Estudo do “upgrade” do forno.....	6
2.2.1. Primeiros conceitos .....	6
2.2.2. Solução final .....	7
2.3. Estrutura.....	8
2.3.1. Construção da estrutura.....	9
3. Sistema de atuação, comando e controlo.....	21
3.1. Sistema de aplicação de carga .....	21
3.2. Sistema de comando e controlo .....	24
3.3. Arquitetura do sistema global.....	26
3.4. Preparação, construção e montagem do sistema global de atuação .....	27
3.5. Software e condicionamento de sinal.....	29
3.5.1. Condicionamento de sinal.....	30
3.5.2. Sistema de ligações .....	33
3.5.3. Calibração da célula de carga .....	35
3.5.4. Calibração da célula de carga incluindo o sistema de condicionamento de sinal .....	36
3.5.5. Desenvolvimento do software .....	37
4. Resultados e discussão.....	40
4.1. Protocolo de ensaio.....	40
4.2. Realização de ensaios sistemáticos.....	42
4.2.1. Variação de altura de trabalho do atuador .....	42
4.2.2. Variação de frequência.....	43
4.2.3. Variação de força.....	43
4.3. Análise e discussão dos resultados .....	44
4.3.1. Estudo da influência da altura.....	44
4.3.2. Estudo da influência da força .....	50



4.3.3. Estudo da influência da frequência .....	54
4.3.4. Conclusões da discussão dos resultados.....	57
4.3.5. Validação teórica dos resultados .....	58
5. Conclusões.....	61
5.1. Sumário .....	61
5.2. Conclusões.....	61
5.3. Trabalhos futuros .....	61
Referências.....	63
Bibliografia .....	64
Anexos.....	65
Anexo A – Catálogo da FESTO .....	65
Anexo B – Catálogo SMC .....	70
Anexo C – Custo do equipamento.....	74
Anexo D – Calibração da célula de carga .....	79

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1 – a) Contacto inicial limitado a algumas microsaliências; b) Aumento da área de contacto por deformação plástica e fluência das microsaliências; c) Eliminação da maioria dos poros e migração da fronteira de grão da interface; d) No fim do processo, a fronteira de grão da interface é indistinguível das restantes fronteiras de grão .....	4
Figura 2 – Forno de vazio utilizado para efetuar SD .....	5
Figura 3 – Desenho conceptual 3D do equipamento concebido para aplicação de carga cíclica para promover a soldadura PDW .....	6
Figura 4 – Desenhos conceptuais 3D de conjunto do equipamento concebido como solução final para a aplicação de carga cíclica para promover a soldadura por PDW.....	7
Figura 5 – Estrutura aproveitada .....	8
Figura 6 – Processo de rebarbar (corte).....	9
Figura 7 – Corte dos perfis I.....	10
Figura 8 – Retirar as rebarbas para facilitar posterior soldadura .....	10
Figura 9 – Perfis I com as chapas soldadas .....	11
Figura 10 – Perfis I soldados ao suporte.....	11
Figura 11 – Perfis U soldados ao suporte .....	12
Figura 12 – Fabrico do perno roscado para apertar na célula de carga.....	12
Figura 13 – Facejamento do perno .....	12
Figura 14 – Padrões 50,60 e 70 mm de comprimento .....	13
Figura 15 – Padrões facejados, polidos e com furo passante.....	13
Figura 16 – Chapas.....	14
Figura 17 – Chapa com furo para entrada do ar .....	14
Figura 18 – Suportes soldados.....	15
Figura 19 – Perfis em L soldados .....	15
Figura 20 – Chapa com caixa circular .....	16
Figura 21 – Tampa soldada e torneada.....	16
Figura 22 – Perfis L na fresadora e corte de 15 mm efetuado .....	17
Figura 23 – Zonas soldadas rebarbadas.....	18
Figura 24 – Estrutura lavada com pistola de pressão de água .....	18
Figura 25 – Estrutura pintada com a cor primária .....	19
Figura 26 – Estrutura com cor final.....	19
Figura 27 – O cilindro de membrana de simples efeito (FESTO) selecionado para esta aplicação .....	21
Figura 28 – Alturas recomendadas de trabalho do cilindro de membrana.....	22
Figura 29 – Gráfico força/pressão .....	22
Figura 30 – Gráfico de carga cíclica a aplicar no processo de soldadura .....	23
Figura 31 – Esquema do sistema de aplicação de carga .....	24

Figura 32 – Regulador/controlador de proporcional selecionado da SMC.....	24
Figura 33 – Regulação do regulador de pressão (ajustado a um máximo de 8 bar).....	25
Figura 34 – Célula de carga de compressão selecionada.....	26
Figura 35 – Componentes do sistema de aquisição e controlo .....	26
Figura 36 – Introdução de <i>raccords</i> no regulador de pressão.....	27
Figura 37 – Introdução da redução do atuador .....	27
Figura 38 – Fixação do regulador na estrutura .....	28
Figura 39 – Processo de aparafusar o atuador à estrutura.....	28
Figura 40 – Montagem da célula de carga na estrutura .....	28
Figura 41 – Ligação da célula de carga ao condicionador de sinal.....	29
Figura 42 – Sistema de comando e controlo.....	30
Figura 43 – Condicionador de sinal.....	31
Figura 44 – <i>Setting-switch</i> .....	31
Figura 45 – Tabela de configurações SW1.....	32
Figura 46 – Tabela de configurações SW3.....	33
Figura 47 – Tabela de configurações SW4.....	33
Figura 48 – Esquema de ligações do condicionador de sinal .....	34
Figura 49 – <i>Pinouts</i> da placa de aquisição.....	34
Figura 50 – Ligações dos equipamentos.....	35
Figura 51 – Gráfico de calibração da célula de carga.....	35
Figura 52 – Gráfico de calibração da célula de carga incluindo o sistema de condicionamento de sinal...37	37
Figura 53 – Painel frontal do <i>software</i> de controlo desenvolvido .....	37
Figura 54 – Diagrama de bolcos do gerador de sinal .....	38
Figura 55 – Diagrama de blocos de aquisição de sinal .....	38
Figura 56 – Ligação da mangueira à saída do ar .....	40
Figura 57 – Introdução da frequência .....	41
Figura 58 – Introdução da força .....	41
Figura 59 – Símbolo de início de ensaio .....	41
Figura 60 – Mangueira do ar solta.....	42
Figura 61 – Gráfico com a influência da altura no ensaio 70-1000 N a 0,5 Hz.....	45
Figura 62 – Gráfico com a influência da altura no ensaio 70-1000 N a 1 Hz.....	45
Figura 63 – Gráfico com a influência da altura no ensaio 70-1000 N a 2 Hz.....	46
Figura 64 – Gráfico com a influência da altura no ensaio 1000-5000 N a 0,5 Hz.....	46
Figura 65 – Gráfico com a influência da altura no ensaio 1000-5000 N a 1 Hz.....	47
Figura 66 – Gráfico com a influência da altura no ensaio 1000-5000 N a 2 Hz.....	47
Figura 67 – Gráfico com a influência da altura no ensaio 5000-10000 N a 0,5 Hz.....	48
Figura 68 – Gráfico com a influência da altura no ensaio 5000-10000 N a 1 Hz.....	48
Figura 69 – Gráfico com a influência da altura no ensaio 5000-10000 N a 2 Hz.....	48
Figura 70 – Gráfico com a influência da altura no ensaio 10000-15000 N a 0,5 Hz.....	49
Figura 71 – Gráfico com a influência da altura no ensaio 10000-15000 N a 1 Hz.....	49

Figura 72 – Atuador com altura de 70 mm.....	50
Figura 73 – Gráfico com a influência da força no ensaio para 0,5 Hz com 90 mm de altura do atuador ...	50
Figura 74 – Gráfico com a influência da força no ensaio para 0,5 Hz com 100 mm de altura do atuador .....	51
Figura 75 – Gráfico com a influência da força no ensaio para 0,5 Hz com 110 mm de altura do atuador .....	51
Figura 76 – Gráfico com a influência da força no ensaio para 1 Hz com 90 mm de altura do atuador .....	52
Figura 77 – Gráfico com a influência da força no ensaio para 1 Hz com 100 mm de altura do atuador ....	52
Figura 78 – Gráfico com a influência da força no ensaio para 1 Hz com 110 mm de altura do atuador ....	53
Figura 79 – Gráfico com a influência da força no ensaio para 2 Hz com 90 mm de altura do atuador .....	53
Figura 80 – Gráfico com a influência da força no ensaio para 2 Hz com 100 mm de altura do atuador ....	54
Figura 81 – Gráfico com a influência da força no ensaio para 2 Hz com 110 mm de altura do atuador ....	54
Figura 82 – Gráfico com a influência da frequência no ensaio 70-1000 N com a altura do atuador de 90 mm.....	55
Figura 83 – Gráfico com a influência da frequência no ensaio 1000-5000 N com a altura do atuador de 90 mm.....	55
Figura 84 – Gráfico com a influência da frequência no ensaio 1000-5000 N com a altura do atuador de 100 mm.....	56
Figura 85 – Gráfico com a influência da frequência no ensaio 5000-10000 N com a altura do atuador de 90 mm.....	56
Figura 86 – Gráfico com a influência da frequência no ensaio 10000-15000 N com a altura do atuador de 90 mm.....	57
Figura 87 – Gráfico da amplitude máxima para os parâmetros que permitiram a obtenção dos melhores resultados.....	59

# ÍNDICE DE TABELAS

---

Tabela 1 – Tabela de características do regulador/controlador da SMC .....	25
Tabela 2 – Tabela com as alturas de trabalho estabelecidas para os ensaios .....	43
Tabela 3 – Tabela com as frequências utilizadas nestes ensaios .....	43
Tabela 4 – Tabela com os intervalos de força estabelecidos para realização dos ensaios .....	44
Tabela 5 – Conjunto de tabelas com os valores ótimos assinalados .....	57

# NOMENCLATURA

---

- A – Ampere;
- AC – Corrente alternada;
- cm – centímetro;
- DC – Tensão contínua;
- DEM – Departamento de Engenharia Mecânica;
- Eq. – Equação;
- f – Frequência;
- F – Força;
- g – Grama;
- GFP – Gradiente funcional de propriedades;
- h – Altura do atuador;
- Hz – Hertz;
- JT – Juntas de transição;
- kg – Quilograma;
- kHz – Quilohertz;
- klbf – Quilolibra força;
- kN – Quilonewton;
- l – Litro;
- lb – Libra;
- l/min – Litro por minuto;
- l/s – Litro por segundo;
- m – Metro;
- M8 – Rosca métrica de 8 mm de diâmetro;
- mm – Milímetro;
- MPa – Mega pascal;
- mV – Milivolte;
- N – Newton;
- PC – Personal computer;

- PDW – Pressuring Diffusion Welding;
- $P_{\text{máx}}$  – Pressão máxima;
- $P_{\text{min}}$  – Pressão mínima;
- $Q_{\text{controlador}}$  – Caudal;
- s – Segundos;
- SD – Soldadura por difusão;
- SW1 – Switch 1;
- SW3 – Switch 3;
- SW4 – Switch 4;
- USB – Universal serial bus;
- V – Volt;
- $V_{\text{inicial}}$  – Volume inicial;
- $V_{\text{retirado}}$  – Volume retirado;
- 3D – Three-dimensional;

# GLOSSÁRIO

---

- **Calibração** - Processo sob condições específicas, no qual se visualiza se o instrumento de medição está conforme a legislação ou norma regulamentada para o instrumento de medição em causa;
- **Estabilidade** - Invariabilidade dimensional mesmo na presença de diversos fatores;
- **Gradiente funcional de propriedades** – Variação de uma ou mais propriedades mecânicas ao longo de uma dimensão espacial, em determinada direção;
- **Junta de transição** – Ligação entre materiais dissimilares;
- **Película superficial de óxidos** – Camada muito fina formada à superfície do material, onde existe o fenômeno de oxidação que consiste na perda de elétrons de qualquer espécie química, levando à degradação de materiais;
- **Precisão** – Grau de variação de resultados de uma medição;
- **Repetibilidade** – Grau de concordância entre os resultados de várias medições, da mesma grandeza, realizados nas mesmas condições;
- **Vibração** – Movimento relativo gerado em sistemas que se repetem num determinado intervalo de tempo.



# 1. INTRODUÇÃO

---

## 1.1. OBJETIVOS

Este projeto pretende que se realize o *upgrade* de um forno de vazio com aplicação de carga cíclica para soldadura por *pressuring diffusion welding*.

Os principais objetivos deste projeto são:

- Estudo, desenvolvimento e conceção de uma estrutura para um forno de vazio para efetuar soldadura por *pressuring diffusion welding*;
- Estudo, desenvolvimento e conceção do sistema de aplicação de carga cíclica, sendo para isso necessário selecionar os componentes essenciais;
- Verificação da viabilidade da solução encontrada através da realização de ensaios.

## 1.2. MOTIVAÇÃO E JUSTIFICAÇÃO DO TRABALHO

*Pressuring Diffusion Welding* (PDW) consiste num processo de união que ocorre no estado sólido. Este processo descende da soldadura por difusão (SD) e difere desta pois durante o processo existe a aplicação de uma carga cíclica que altera sinusoidalmente, ao contrário do que acontece com SD pois nesta a carga aplicada é constante.

Com o processo PDW é possível obter juntas de maior resistência mecânica e também reduzir o tempo de processamento, pois a aplicação de carga sinusoidal provoca a destruição da película superficial de óxidos, o que facilita a união de ligas com elevada cinética de oxidação superficial [1], sendo as ligas de alumínio e as ligas de titânio disso exemplos.

O PDW torna-se extremamente importante na indústria de transportes, pois ao facilitar a união entre ligas leves e de alta cinética de oxidação superficial, constitui uma técnica de ligação eficaz para a produção de componentes mais leves que por seu turno permitem reduzir o peso dos veículos e consequentemente, o consumo de combustível [2].

Neste projeto pretende-se estudar e realizar o necessário para que seja possível obter o equipamento que obedeça as especificações pretendidas.

O equipamento em causa é constituído por vários sistemas, sendo eles, o sistema de aplicação de carga, o sistema de fornecimento de calor, o sistema de refrigeração, o sistema de vácuo e o sistema de comando e controlo.

Tratando-se de um equipamento laboratorial será orientado para que o operador possa controlar o sistema.

### **Juntas de transição de elevada performance**

Devido à investigação direccionada para a melhoria da eficiência dos processos de fabrico e materiais utilizados na elaboração de componentes, encontrou-se um novo processo de união de materiais, designado de soldadura por difusão. Este diferencia-se dos processos de soldadura convencionais por ser conduzido no estado sólido. Através deste processo de fabrico obtêm-se várias melhorias nas juntas de transição entre os materiais, satisfazendo requisitos distintos dos tempos modernos.

Uma das principais vantagens é o facto deste processo poder ser aplicado na produção de chapas com gradiente funcional de propriedades (GFP), obtida mediante a união de chapas com diferentes formas, materiais e espessuras, destinadas a posterior maquinagem ou conformação. A elaboração de chapa com GFP requer a união de materiais de características dissimilares logo, a produção de juntas de transição (JT).

Os processos de soldadura convencionais induzem nas JT elevadas tensões residuais e formam fases frágeis que podem facilitar a nucleação e propagação de fissuras. Adicionalmente, variações nas propriedades através da espessura da JT, poderão afetar negativamente o desempenho mecânico das uniões. Assim, torna-se difícil a obtenção de juntas de elevada performance.

A soldadura por difusão sendo conduzida no estado sólido elimina o risco de fissuração decorrente da solidificação, a degradação das propriedades dos materiais e a formação de fases frágeis nas finas JT resultantes são eliminadas.

**Processamento das juntas de transição pelos processos SD e PDW**

Os processos SD e PDW são processos de união totalmente efetuados no estado sólido, sendo assim excluída a intervenção de qualquer fase líquida na formação das juntas. De forma geral, pode dizer-se que estes processos são conduzidos nas seguintes condições [1], [3]:

- A temperatura de ligação é inferior à temperatura de fusão dos materiais de base;
- O tempo de estágio, quando à temperatura de ligação, tem uma variação entre alguns minutos e várias horas;
- Para que haja ligação é necessária a aplicação de pressão que deverá ser relativamente inferior as que provocariam deformações plásticas macroscópicas nos materiais de base;
- Eventualmente, poderá ser colocada uma camada intermédia entre os materiais de base, para que facilite a ligação ou impeça a formação de fases frágeis na interface.

As principais vantagens que se retiram da realização destes processos no estado sólido passam pela possibilidade de obter junções em que a interface apresenta composição química e estrutura idêntica à dos materiais base, e consequentemente, resistência mecânica semelhante.

Uma vez que se tratam de processos realizados no estado sólido, os riscos de fissuração associados à solidificação são eliminados e a degradação da superfície dos componentes a ligar é mínima, quando comparada aos processos que envolvem a formação e a reação de um líquido na zona de ligação [4].

A formação da junta é provocada pela deformação microscópica dos materiais de base na interface, em conjunção com mecanismos de difusão. Normalmente, o processo de ligação processa-se através de três fases [1]:

- FASE I – Deformação das microsaliências;
- FASE II – Transporte de massa controlado por difusão;
- FASE III – Migração da interface.

Na figura 1 é possível observar a representação esquemática do processo de formação de uma junta obtida por SD. Este processamento das juntas de transição, utilizando os processos SD e PDW, foi já convenientemente descrito pelos autores em [2].

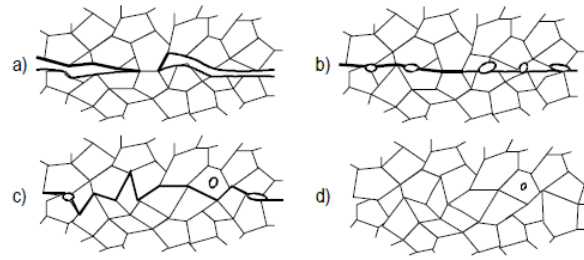


Figura 1 – a) Contacto inicial limitado a algumas microsaliências; b) Aumento da área de contacto por deformação plástica e fluência das microsaliências; c) Eliminação da maioria dos poros e migração da fronteira de grão da interface; d) No fim do processo, a fronteira de grão da interface é indistinguível das restantes fronteiras de grão [2].

### 1.3. ESTRUTURA DA TESE

No **capítulo 2**, relata-se a conceção da estrutura de um forno de vazio para soldadura por PDW. Aqui aborda-se o forno existente e a toda a construção da estrutura do forno que se pretende obter, bem como, todas as soluções idealizadas para este projeto.

No **capítulo 3**, é abordado o sistema de atuação, comando e controlo, no qual se faz referência ao sistema de aplicação de carga, sistema de comando e controlo, arquitetura do sistema global e ao trabalho a nível de *software* e condicionamento de sinal.

No **capítulo 4**, são apresentados os resultados obtidos depois de algumas sessões de ensaios realizadas, assim como, a discussão dos mesmos.

No **capítulo 5**, são referidas todas as conclusões a retirar da realização deste projeto. Aqui são também recomendados trabalhos futuros para melhoria do forno.

## 2. CONCEÇÃO DE UM FORNO DE VAZIO PARA SOLDADURA POR PDW

---

De seguida, será apresentado o forno existente e aquele que se pretende conceber para a realização de soldadura por PDW. Por fim, serão apresentadas todas as etapas realizadas para a conceção da estrutura para o forno para o PDW.

### 2.1. FORNO EXISTENTE

O forno de vazio atualmente existente nos laboratórios do DEM é o apresentado na figura 2. Este foi concebido para realizar soldadura por difusão (SD) aplicando uma carga constante. Uma vez que a carga aplicada é constante, o tempo de processamento será relativamente demorado, assim dar-se-á a formação de uma camada de óxidos.

Na figura 2 é possível observar alguns dos sistemas e componentes que constituem este forno.



Figura 2 – Forno de vazio utilizado para efetuar SD [2].

Obviamente que a formação de uma camada de óxidos não é um aspeto positivo. Nesse sentido, será realizado um estudo, desenvolvimento e conceção de um forno que efetue *pressuring diffusion welding* (PDW). Este possuirá um sistema de aplicação de carga cíclica que impedirá a formação de uma camada de óxidos em componentes com elevada cinética de oxidação.

## 2.2. ESTUDO DO “UPGRADE” DO FORNO

A realização de um *upgrade* vem no sentido de fazer com que, o forno a construir aplique uma carga cíclica. Para tal, efetuou-se um estudo do mercado de forma a facilitar a seleção de componentes que possam ser utilizados neste forno.

De seguida, apresentam-se as possíveis soluções que poderiam dar origem à estrutura do forno como podemos verificar em 2.2.1. e 2.2.2.

### 2.2.1. PRIMEIROS CONCEITOS

A figura 3 apresenta um primeiro desenho conceptual de conjunto do equipamento concebido para a aplicação de carga cíclica, que tem como base uma estrutura existente no departamento de engenharia mecânica, para promover a soldadura por PDW, o qual inclui o sistema de aplicação de carga, o de aquecimento por indução, o de arrefecimento a água e o de vácuo. Todo o equipamento foi concebido de modo a incorporar todos os sensores necessários ao funcionamento do forno (termopares, sensor de vácuo e sensor de carga), bem como os órgãos atuadores (como a bomba de vácuo, a bomba de circulação de água, a bobine de indução e o atuador pneumático, o qual deverá funcionar juntamente com o respetivo regulador/controlador).

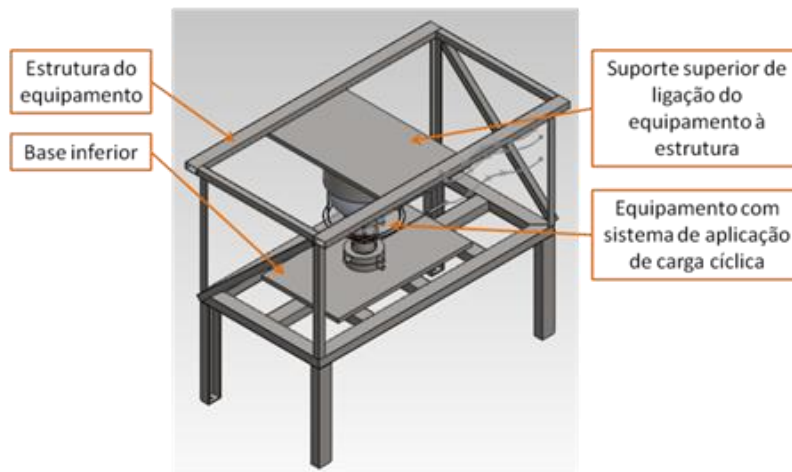


Figura 3 – Desenho conceptual 3D de conjunto do equipamento concebido para a aplicação de carga cíclica para promover a soldadura por PDW.

Após uma análise desta solução foi possível concluir que esta, para além de não obedecer aos parâmetros de ergonomia, é uma estrutura demasiadamente esbelta que não lhe confere a resistência mecânica exigida com a aplicação das elevadas cargas cíclicas em causa.

### 2.2.2. SOLUÇÃO FINAL

Na construção deste equipamento a ergonomia foi um ponto a ter em consideração, assim como a robustez e a compactidade.

A ergonomia tem como objeto de estudo o homem no contexto de trabalho, ou seja, a interface homem-máquina, assim como, o ambiente de trabalho. No caso em estudo o que teve maior relevância foi a interface homem-máquina.

A interação homem-máquina pode dar-se em dois sentidos:

- Da máquina para o operador (através dos indicadores existentes na máquina);
- Do operador para a máquina (através dos controlos).

No desenvolvimento deste projeto, a altura da zona de trabalho da máquina foi uma preocupação a ter em causa [5], [6], [7]. Depois de uma breve análise da primeira solução, concluiu-se que esta não seria viável uma vez que, a zona de trabalho se encontrava a uma altura demasiado baixa e muito desconfortável. Assim, optou-se pela 2ª solução (figura 4) em que se adotou uma maior altura da zona de trabalho e se forneceu maior resistência.

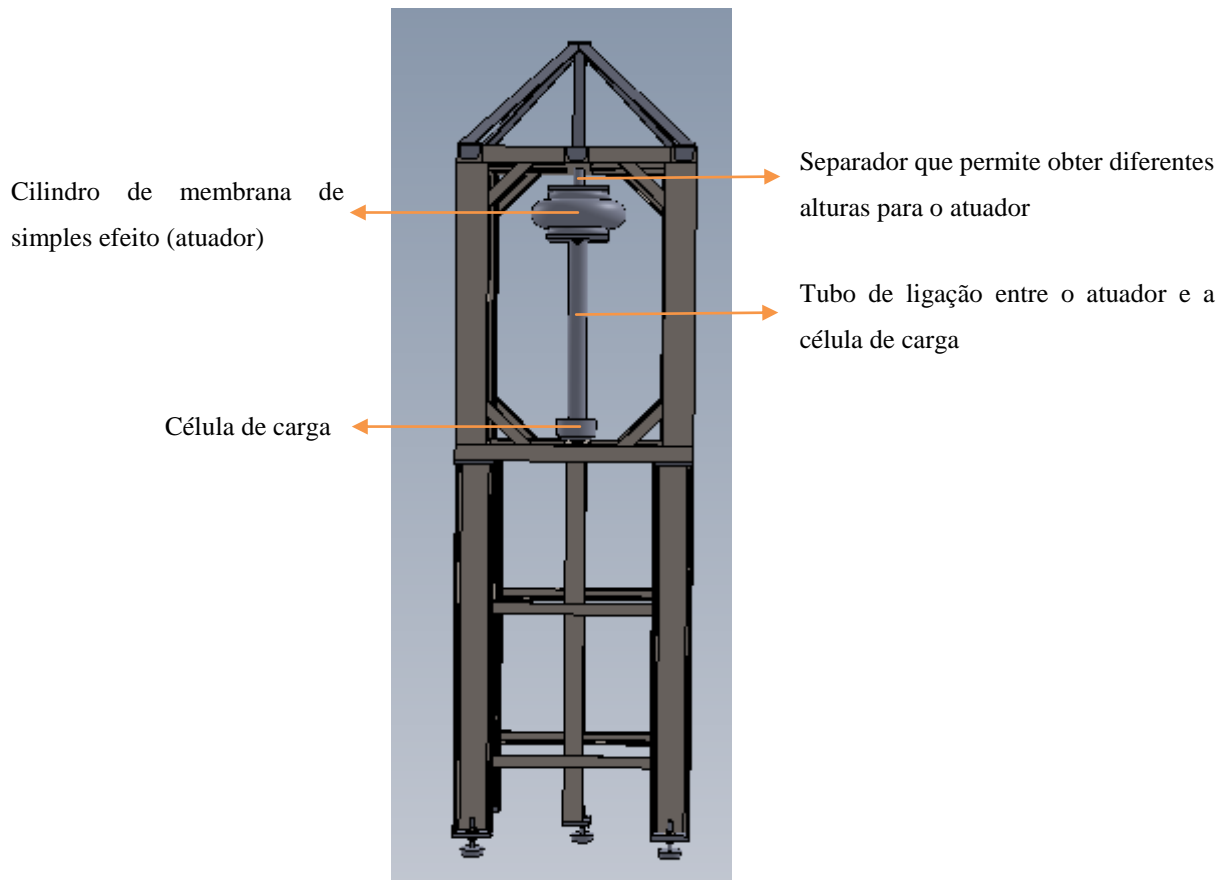


Figura 4 – Desenhos conceptuais 3D de conjunto do equipamento concebido como solução final para a aplicação da carga cíclica para promover a soldadura por PDW.

### 2.3. ESTRUTURA

Para se realizarem os ensaios de aplicação de carga cíclica foi necessário proceder-se à construção de uma estrutura rígida para efetuar a montagem do atuador. Num laboratório do DEM existia a estrutura apresentada na figura 5, a qual, por motivos de economia de custos e tempo, terá permitido aproveitar algum do seu material.

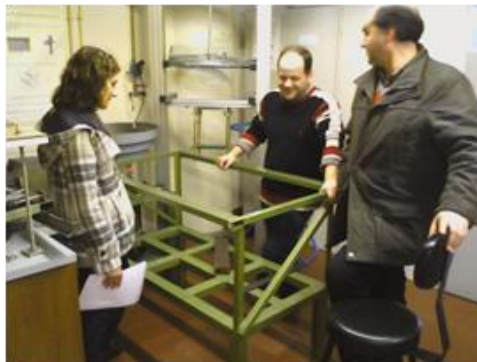


Figura 5 – Estrutura aproveitada.

1ª Fase – Inicialmente, verificou-se que a estrutura seria demasiado larga para o atuador em causa. Pensou-se que o melhor seria realizar a montagem do atuador numa das metades da mesa, pois, aquilo que se pretende é que este aplique cargas cíclicas da ordem dos 1500 kg e para tal seria a zona que ofereceria maior resistência. Ainda assim, chegou-se à conclusão que a resistência que a estrutura apresentava parecia não ser suficiente. Assim, considerou-se a hipótese de soldar material nas zonas da mesa que seriam mais solicitadas para as tornar mais rígidas.

2ª Fase – Rapidamente se concluiu que esta não seria a melhor solução, pois, para além de ser pouco ergonómica, visto apresentar uma posição de trabalho abaixo de 1 m, a estrutura também iria ocupar muito espaço, o que seria desnecessário pois este não seria totalmente utilizado.

Optou-se então, por marcar e cortar a estrutura de forma a aproveitar unicamente partes que seriam utilizadas na nova estrutura. O que se pretende ao efetuar o corte da estrutura é obter dois suportes (para cima e para baixo), um para o atuador e outro para a célula de carga.



Como foi referido anteriormente, a estrutura não obedeceria a algumas condições relacionadas com a ergonomia. Para melhorar esse aspeto, selecionou-se um perfil em I, para o fabrico dos apoios da estrutura, com 1 m de altura. Estas, seriam soldadas posteriormente, na parte inferior do suporte selecionado para apoio da célula de carga. Serão soldados 5 apoios, um dos quais será soldado a meio da estrutura para garantir uma maior resistência, uma vez que serão aplicadas cargas de 1500 kg.

Para a união entre o suporte da célula de carga e o suporte do atuador foi escolhido um perfil U com 75 cm de altura.

3ª Fase – Depois de desmontado o equipamento existente na estrutura, esta foi transportada para as oficinas de formação e apoio do DEM, local onde se irão realizar todos os processos necessários à conceção da estrutura.

### 2.3.1. *CONSTRUÇÃO DA ESTRUTURA*

Para a construção da estrutura foi necessário realizar os seguintes passos:

1 – Na figura 6 pode-se observar o corte de todas as partes aproveitadas para a nova estrutura;



Figura 6 – Processo de rebarbar (corte).

2 – De seguida, cortaram-se as zonas da estrutura que se pretendia que fossem aproveitadas para a nova estrutura, obtendo assim os seguintes perfis:

3 – Com a rebarbadora e um disco de rebarbar, trabalharam-se as superfícies que sofreram o corte, de modo a que ficassem lisas para facilitar a soldadura;

4 – Na figura 7 apresenta-se o corte de 5 perfis em I de 1 m de comprimento, os quais servirão de apoios da estrutura;



Figura 7 – Corte dos perfis I.

5 – Efetuar o corte de 5 chapas para soldar aos perfis I de forma a facilitar a soldadura do perfil à base do suporte inferior;

6 – Cortar 5 chapas para soldar à base dos perfis I e furar as chapas para mais tarde ser possível a introdução de uns pés reguláveis;

7 – A figura 8 mostra a rebarbagem das extremidades dos apoios da estrutura para facilitar a soldadura;



Figura 8 – Retirar as rebarbas para facilitar posterior soldadura.

8 – Na figura 9 apresenta-se a soldadura das chapas aos perfis em I;



Figura 9 – Perfis I com as chapas soldadas

9 – Corte dos perfis em U com 70 cm;

10 – Rebarbar as extremidades dos perfis em U para facilitar a sua soldadura aos suportes superior e inferior;

11 – Reforçar as soldaduras existentes no suporte superior;

12 – Soldar os perfis em I ao suporte inferior, como é possível verificar na figura 10;



Figura 10 – Perfis I soldados ao suporte.

13 – Na figura 11 pode-se observar a soldadura dos perfis em U ao suporte superior;



Figura 11 – Perfis U soldados ao suporte.

14 – Na figura 12 tem-se um perno roscado, fabricado no torno, com a principal função de aparafusar no furo roscado existente na célula de carga. O lado oposto ficará preso à estrutura através de uma porca;



Figura 12 – Fabrico do perno roscado para apertar na célula da carga.

15 – Na fresadora, facejar o perno de forma a fazer duas faces, como se pode ver na figura 13;



Figura 13 – Facejamento do perno.

16 – Verificar o encaixe do fuso no furo roscado da célula de carga;

17 – Furar o suporte inferior para encaixar o perno que ficará fixo a este com a ajuda de uma porca;

18 – Na figura 14 tem-se a produção dos padrões de 50, 60 e 70 mm de comprimento com diâmetro de 25 mm para o suporte superior. Assim, o atuador ficará ligeiramente afastado do suporte e para além de facilitar a passagem do tubo do ar comprimido, irá principalmente permitir testar o atuador para as diferentes alturas de trabalho;



Figura 14 – Padrões de 50, 60 e 70 mm de comprimento.

19 – Facejar e polir os separadores e de seguida fazer um furo passante em cada um dos padrões (figura 15), para que estes sejam apertados ao atuador com um parafuso M8;



Figura 15 – Padrões facejados, polidos e com furo passante.

20 – Escarear os furos efetuados nos padrões, utilizando o engenho de furar, de forma a retirar as rebarbas existentes;

21 – Fazer dois furos no suporte superior com 89 mm de distância entre eles;

22 – Cortar dois perfis em U com 212 mm e soldar no suporte superior para oferecer maior resistência;

23 – A figura 16 apresenta o corte de 2 chapas de 160 x 160 mm. Estas serão rebarbadas e furadas, para mais tarde, serem aparafusadas às superfícies do atuador;

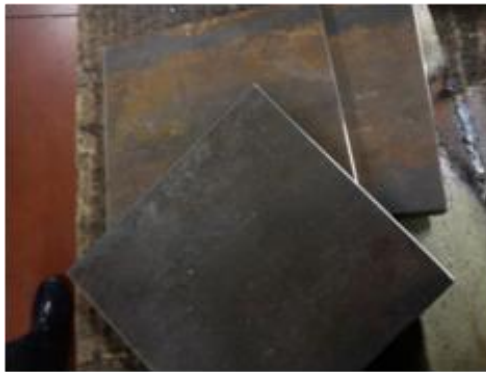


Figura 16 – Chapas.

24 – A figura 17 mostra que irá fazer-se um furo na chapa que fica na parte superior do atuador para facilitar a entrada de ar comprimido;



Figura 17 – Chapa com furo para entrada de ar.

25 – Na figura 18 apresenta-se a soldadura do suporte superior ao inferior;



Figura 18 – Suportes soldados.

26 – Corte de 8 perfis em L que servirão para fazer duas prateleiras para suporte de alguma ferramenta, 4 dos quais cortados com 305 mm e os restantes com 415 mm;

27 – Soldar os perfis, como se vê na figura 19, para que estes formem duas prateleiras que permitam suportar algum equipamento e sejam utilizadas como arrumação;



Figura 19 – Perfis em L soldados.

28 – Rebarbar as zonas soldadas da estrutura;

29 – Corte de um tubo com 500 mm de comprimento, o qual terá como função realizar a ligação entre o atuador e a célula de carga;

30 – Fazer uma caixa circular na chapa, do ponto 23, como se pode verificar na figura 20, para que seja possível encaixar o tubo anteriormente abordado;

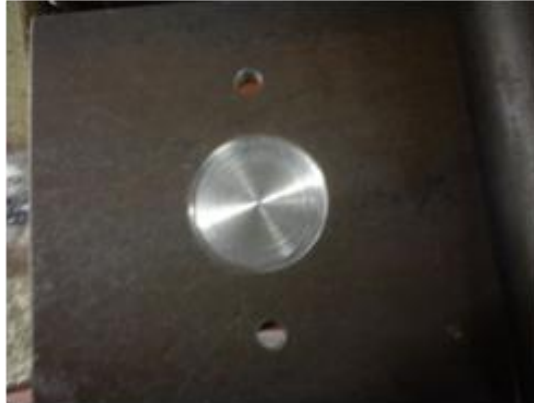


Figura 20 – Chapa com caixa circular.

31 – Torneare o interior do tubo para posteriormente soldar uma tampa;

32 – Fazer a tampa no torno e soldá-la ao tubo, torneando por fim a zona soldada, como se pode observar na figura 21;



Figura 21 – Tampa soldada e torneada.

33 – Torneare a caixa de forma a criar uma reentrância para encaixar na célula da carga;

34 – Cortar 8 perfis L (cantoneiras) com 170 mm de comprimento a 45 graus, para serem usadas no reforço da estrutura, retirar as rebarbas nelas existentes e, por fim, soldá-las na estrutura;

35 – Cortar 6 apoios de 60 x 60 mm de uma chapa com 6 mm de espessura e retirar-lhes as rebarbas;



36 – Cortar 4 perfis L com 449 mm de comprimento e com um ângulo de 50 graus para serem utilizados como reforços no suporte superior;

37 – Soldar os apoios, referidos em 35, à parte superior da estrutura;

38 – Fresar os ângulos dos perfis L referidos em 36 e cortar 15 mm dos cantos da extremidade (figura 22);



Figura 22 – Perfis L na fresadora e corte de 15 mm efetuado.

39 – Rebarbar as soldas dos apoios;

40 – Marcar os graus no apoio superior para soldar as cantoneiras;

41 – Soldar os perfis L ao apoio superior;

42 – Cortar um tubo quadrado com 291 mm de comprimento e a soldá-lo ao apoio superior;

43 – Soldar os perfis L e do tubo aos apoios inferiores;

44 – Cortar 6 chapas de 2 mm de espessura para soldar posteriormente aos topos dos perfis em U do suporte superior;

45 – A figura 23 ilustra as zonas soldadas rebarbadas, para que a superfície fique mais lisa;



Figura 23 – Zonas soldadas rebarbadas.

46 – Tentativa de remoção da tinta e da ferrugem com discos apropriados. Mas rapidamente se concluiu que não é a melhor opção;

47 – Remoção do brilho da tinta com uma lixa;

48 – Aplicar o removedor de ferrugem;

49 – Lavar a estrutura com uma pistola de pressão de água, de modo a retirar o removedor de ferrugem, e como se pode verificar na figura 24 obtendo o efeito pretendido;



Figura 24 – Estrutura lavada com pistola de pressão de água.

50 – Esperar que a estrutura seque e passar-lhe uma escova de aço de forma a retirar a película que se formou;

51 – Passar diluente em toda a estrutura;

52 – A figura 25 apresenta a pintura da estrutura com a cor primária;



Figura 25 – Estrutura pintada com a cor primária.

53 – Por fim na figura 26 apresenta-se a estrutura com a cor final;



Figura 26 – Estrutura com cor final.

**Sumário:** Neste capítulo realizou-se uma breve apresentação do forno já existente, este capaz de realizar soldadura por difusão (SD). Também foi abordada toda a construção da estrutura para o forno capaz de realizar o PDW.

São apresentadas no decorrer deste capítulo as soluções idealizadas, e a selecionada como solução final. Esta, acompanhada de uma breve explicação onde se relatam os motivos que levaram à sua escolha.

Em anexo (Anexo C) pode-se verificar todo o material utilizado para a construção desta estrutura, assim como o respetivo custo.

### 3. SISTEMA DE ATUAÇÃO, COMANDO E CONTROLO

---

O sistema de comando e controlo, como o nome indica, tem por função efetuar o registo de dados provenientes dos ensaios/testes do sistema de aplicação de carga, assim como realizar o controlo das variáveis referentes ao mesmo sistema.

#### *3.1. SISTEMA DE APLICAÇÃO DE CARGA*

O sistema de aplicação de carga terá de ir em conta com as especificações, como tal, será um sistema que aplica cargas periódicas sinusoidais entre os valores 0,07 a 15 kN e com uma frequência de aplicação de carga entre 0,5 a 5 Hz. Existem vários sistemas capazes de aplicar cargas cíclicas no mercado. Após a análise de várias soluções existentes a seleção recaiu sobre um cilindro pneumático de membrana de simples efeito. Este atuador encontra-se ilustrado na figura 27.

Estes tipos de cilindros são dotados de várias características, tais como [8]:

- Utilizado como elemento de mola ou para redução de oscilação;
- Grandes forças com cursos reduzidos;
- Movimentos uniformes e sem atrito;
- Pode ser utilizado em ambientes com algum pó ou na água, e
- Não necessita de manutenção.



Figura 27 – O cilindro de membrana de simples efeito (FESTO) selecionado para esta aplicação [8].

Na seguinte figura (figura 28) encontra-se assinalada a perspetiva de corte de um cilindro de membrana de simples efeito, bem como as alturas de trabalho permitidas para um atuador deste tipo.

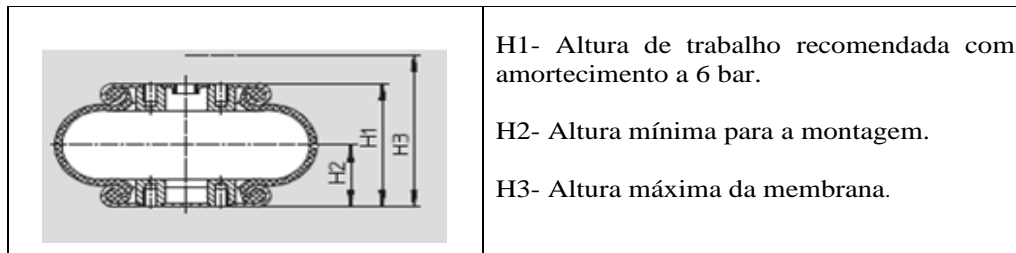


Figura 28 – Alturas recomendadas de trabalho do cilindro de membrana [8].

Através do catálogo da empresa FESTO [8] efetuou-se a seleção do cilindro pneumático, tendo este, um diâmetro de 250 mm, H1=110 mm (sendo H1 a altura recomendada de trabalho), podendo trabalhar no intervalo de temperaturas de -40 °C a +70 °C e possuindo uma massa de 2,3 kg. O cilindro FESTO selecionado tem a referência EB-250-85 #36489.

Através da figura 29 é possível verificar que:

- Com 8 bar em H1, tem-se uma força de 15 kN;
- Com 5 bar em H1, tem-se uma força de 10 kN;
- Com 1 bar em H1, tem-se uma força de 2 kN;
- Com <1 bar em H1, tem-se uma força <1 kN.

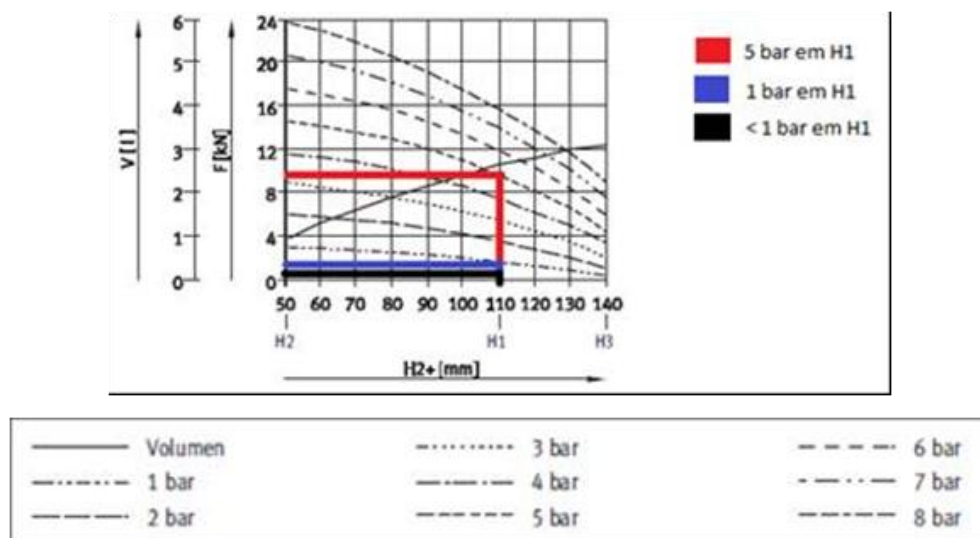


Figura 29 – Gráfico força/pressão [8].

A figura 30 apresenta o gráfico de variação de carga exigida nas especificações do projeto do equipamento; esta carga cíclica varia entre 0,07 e 15 kN. Isto torna-se possível com a alteração da pressão fornecida ao atuador pneumático (cilindro de membrana).

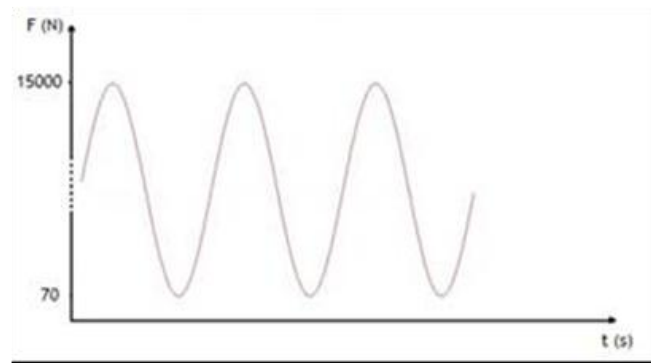


Figura 30 – Gráfico de carga cíclica a aplicar no processo de soldadura.

No âmbito de estudos preliminares efetuados relativamente à seleção do tipo de tecnologia a empregar no sistema de aplicação de carga, foram ponderadas a utilização de vários tipos de tecnologia: óleo-hidráulica, elétrica e pneumática. Num primeiro estudo, realizado pelos mesmos autores [2], foi projetado um sistema de aplicação de carga utilizando tecnologia servo hidráulica; todavia, e apesar de muito adequado, este sistema hidráulico apresenta um custo muito elevado, bem como um controlo muito complexo. Deste modo, e após um estudo de detalhe, foi selecionada uma solução com tecnologia pneumática, que é mais económica que a anterior, e que cumpre as especificações mínimas exigidas. A única limitação prende-se com as dimensões de atravancamento do atuador pneumático de membrana necessário para aplicar a carga máxima exigida (15 kN).

A figura 31 mostra o sistema idealizado para o sistema de aplicação de carga cíclica. Este é constituído por um conjunto de elementos que permitem o comando e o controlo do atuador de membrana pneumático.

Os elementos principais considerados neste sistema são: o atuador pneumático de membrana, uma célula de carga de compressão, um regulador/controlador de pressão, uma unidade de condicionamento do ar (filtro, lubrificador, regulador de pressão e manómetro, apelidado de unidade LUBRIFIL), carta de aquisição de dados e um PC com *software* específico desenvolvido na plataforma *LabView* (da *National Instruments*). De modo a que o sistema de controlo de aplicação de força cíclica possa funcionar em malha fechada, e com uma boa repetibilidade, este irá contar com uma célula de carga de compressão do tipo piezoelétrico.

O regulador/controlador pneumático proporcional utilizado foi selecionado de forma a cumprir os requisitos impostos ao sistema de atuação, em termos de cargas e frequências aplicadas.

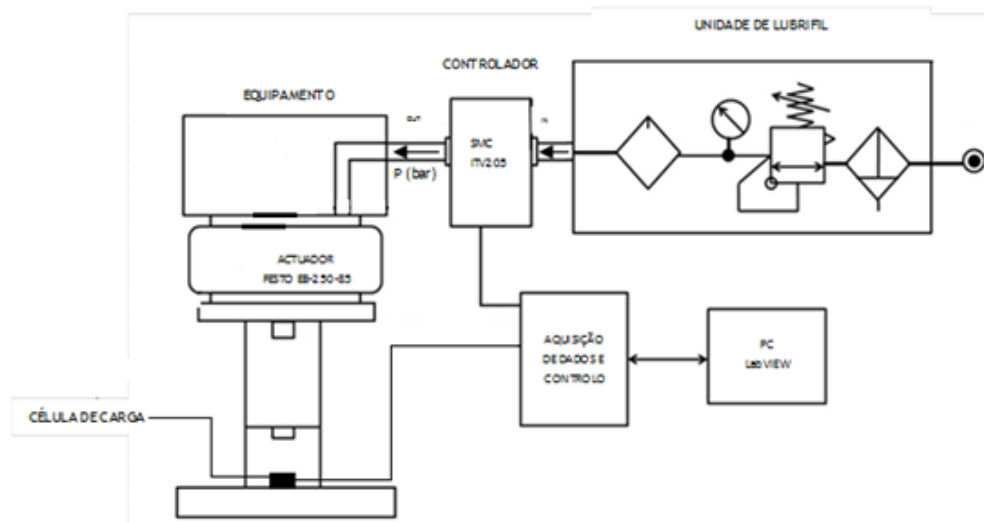


Figura 31 – Esquema do sistema de aplicação de carga.

### 3.2. SISTEMA DE COMANDO E CONTROLO

Para o sistema de comando e controlo foi necessário proceder à seleção de um regulador/controlador de pressão, o que equivale, portanto, a um sistema de comando e controlo baseado numa válvula proporcional para a regulação de pressão a fornecer ao atuador. Este regulador foi selecionado tendo em conta a gama de forças que se pretende aplicar. Para tal, optou-se por um regulador/controlador da marca SMC (ver figura 32) que permite regular a pressão entre 0,005 bar e 9 bar [9]. A pressão máxima que pode ser regulada é de 8 bar porque é a pressão limite de utilização do atuador de membrana.



Figura 32 – Regulador/controlador proporcional selecionado da SMC [9].

Na tabela 1 estão listadas as principais características do regulador/controlador de pressão selecionada [9].



Tabela 1 - Tabela de características do regulador/controlador da SMC [9].

Modelo	ITV2050-313CS3-Q
Pressão mínima de fornecimento	+ 0,1 MPa
Pressão máxima de fornecimento	1,0 MPa
Alcance de pressão	0,005 a 0,9 MPa
Voltagem	24 VDC $\pm$ 10%
Consumo de corrente	0,12 A
Sinal de entrada	0 a 10 DC
Impedância de entrada	250 $\Omega$ ou inferior
Saída analógica	1 a 5 DC
Linearidade	$\pm$ 1%
Histerese	0,5%
Repetibilidade	$\pm$ 0,5%
Sensibilidade	0,2%
Características da temperatura	$\pm$ 0,12%
Exatidão do mostrador da pressão de saída	$\pm$ 3%
Temperatura ambiente e do fluido	0 a 50°C
Invólucro	Equivalente ao IP65
Massa	350 g

O esquema da figura 33 permite explicar de forma muito resumida as características de maior importância do regulador/controlador, como por exemplo, a pressão e a força que se pode obter com essa pressão.

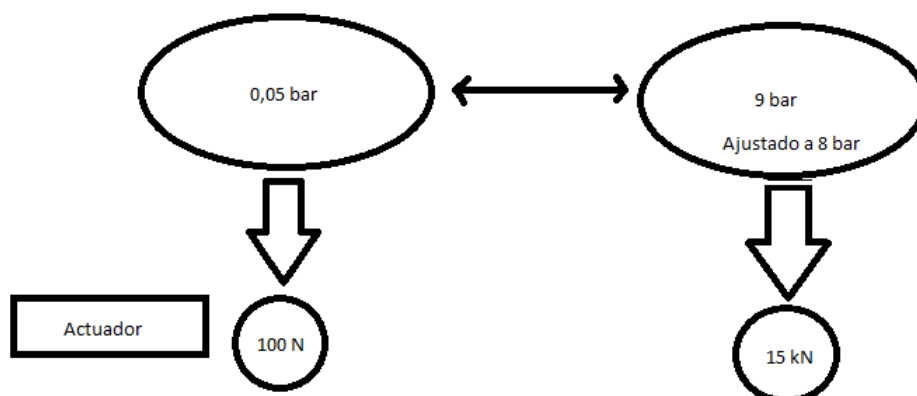


Figura 33 – Regulação do regulador de pressão (ajustado a um máximo de 8 bar).

### 3.3. ARQUITETURA DO SISTEMA GLOBAL

No sentido de avaliar o desempenho do sistema pneumático de aplicação de carga constituído pelo atuador de membrana e o regulador/controlador, seleccionados e apresentados anteriormente, foi necessário conceber uma arquitetura de comando e controlo. Para tal, em primeiro lugar, foi seleccionada uma célula de carga adequada ao tipo de carga (compressão) e força máxima (15 kN) do sistema de atuação pretendido. A figura 34 apresenta a célula de carga escolhida da marca *Interface*, modelo 3200 com carga máxima de compressão de 5 klbf (22,24 kN).



Figura 34 – Célula de carga de compressão seleccionada.

Para efetuar o controlo e a aquisição de dados do sistema de aplicação de carga cíclica, será utilizada uma placa de aquisição de dados NI DAQPad-6015 da marca *National Instruments®* ligada por USB a um *Laptop PC* e um programa dedicado desenvolvido no editor *LabVIEW®* [10], [11] da mesma marca. Este editor permite uma elevada flexibilidade de configuração, como seja: realizar aquisição, tratamento, apresentação e armazenamento/gravação de dados, bem como realizar comando analógico e digital. A figura 35 apresenta os principais constituintes do sistema de aquisição e controlo da carga cíclica utilizados, nomeadamente, a célula de carga, a placa de aquisição de dados com terminal de ligações, o *Laptop PC* com editor *LabVIEW®*, o atuador de membrana e respetivo regulador/controlador de pressão pneumático.

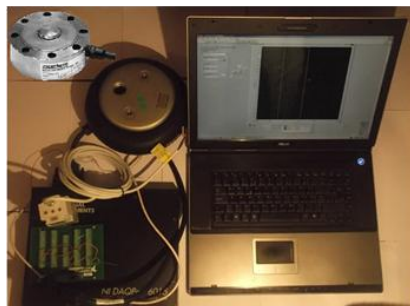


Figura 35 – Componentes do sistema de aquisição e controlo.

### 3.4. PREPARAÇÃO, CONSTRUÇÃO E MONTAGEM DO SISTEMA GLOBAL DE ATUAÇÃO

- 1 – Colocar teflon em todas as ligações, para evitar a fugas de ar comprimido;
- 2 – Ligar o ligador rápido para ar comprimido (*raccord*) de medida 3/4 à tubagem de 10 mm;
- 3 – A figura 36 mostra a introdução das uniões *raccord* de ligação rápida 3/8 para tubo de 10 mm no regulador de pressão;



Figura 36 – Introdução de *raccords* no regulador de pressão.

- 4 – Na figura 37 tem-se a introdução da redução no atuador pneumático 3/4 macho para 1/2 fêmea;



Figura 37 – Introdução da redução do atuador.

- 5 – Apertar o *raccord* de 3/4 no atuador;
- 6 – Fixar o regulador à estrutura, como se verifica na figura 38;



Figura 38 – Fixação do regulador na estrutura.

7 – Na figura 39 aparafusa-se o atuador à estrutura;



Figura 39 – Processo de aparafusar o atuador à estrutura.

8 – Inserir a tubagem no regulador e no atuador;

9 – Realizar a montagem da célula de carga na estrutura, como se pode observar na figura 40;

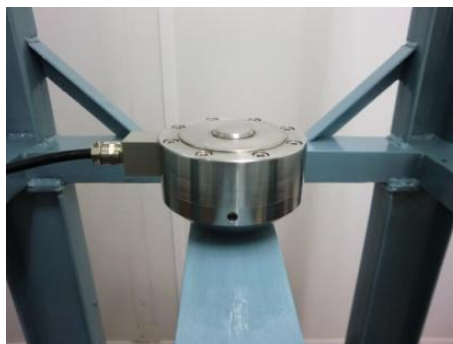


Figura 40 – Montagem da célula de carga na estrutura.

10 – Colocar o tubo entre o atuador e a célula;

11 – Nivelar os pés da estrutura recorrendo a uma régua niveladora, para que esta se torne estável;

12 – Adequar o condicionador de sinal da célula de carga (alteração da tomada de energia AC para o formato europeu);

13 – A figura 41 apresenta a ligação da célula de carga ao condicionador de sinal da mesma;



Figura 41 – Ligação da célula de carga ao condicionador de sinal.

14 – Preparar o PC para a receção de dados;

15 – Testar o PC e o sistema;

16 – Ver qual a pressão máxima da rede (6,15 bar);

### ***3.5. SOFTWARE E CONDICIONAMENTO DE SINAL***

Com o sistema de comando e controlo pretende-se proceder à automatização do equipamento em causa. Para tal, é necessário realizar o controlo do atuador pneumático através de um regulador de pressão, que por sua vez será controlado por um programa desenvolvido no editor *LabVIEW®*.

Como foi referido no desenvolvimento deste trabalho pretende-se que seja possível aplicar cargas cíclicas num intervalo entre 70 a 15000 N, com uma gama de frequências que irão variar de 0,5 a 5 Hz.

No entanto, é necessário realizar alguns testes para que seja possível determinar a frequência máxima na qual o equipamento permite trabalhar.

A maior dificuldade deste sistema prende-se na obtenção de carga cíclica uma vez que apresenta algumas variáveis.

O sistema de comando e controle terá de oferecer algo semelhante à seguinte figura 42.

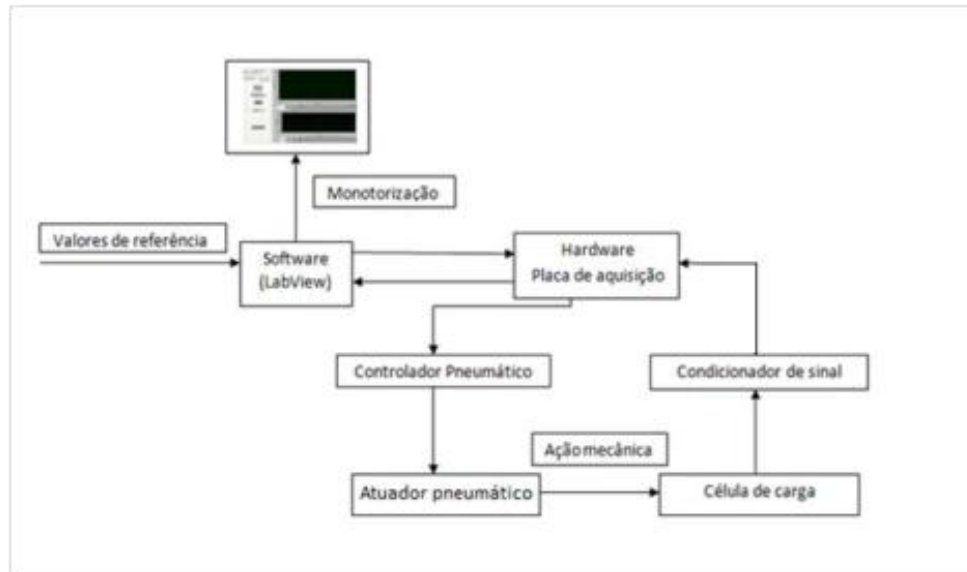


Figura 42 – Sistema de comando e controle.

### 3.5.1. *CONDICIONAMENTO DE SINAL*

Como é possível verificar nas especificações da célula de carga selecionada, esta apresenta uma sensibilidade de 4,32786 mV/V, ou seja, quando é alimentada a 10 V irá gerar um sinal à saída de:

$$4,32786 \times 10 = 43,2786 \text{ mV (Eq. 1)}$$

Assim, quando a célula é alimentada com uma tensão DC de 10 V e se encontra sob carga máxima (5 klbf), esta irá gerar 43,2786 mV.

Uma vez que a variação de sinal é pequena, torna-se necessário amplificar o sinal de saída para uma faixa de amostragem de 10 V, sendo esta a correspondente para a placa de aquisição.

Para a amplificação do sinal será utilizado o amplificador apresentado na figura 43.



Figura 43 – Condicionador de sinal.

Neste é importante definir quais os filtros e o ganho a serem utilizados, e claro efetuar corretamente as ligações.

Como se pode observar na figura 44, este condicionador contém vários *outputs* *Switch*, que têm de ser configurados de acordo com as condições de sinal e entrada, sinais de saída e também com a escolha dos filtros adequados.

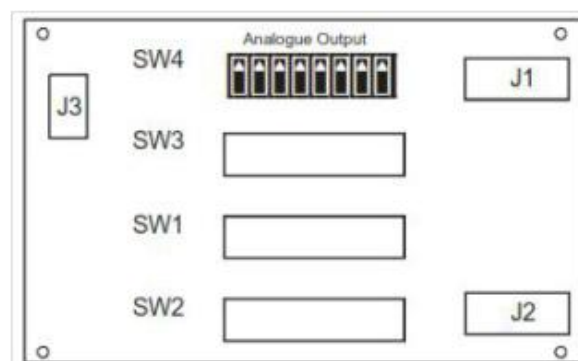


Figura 44 – Setting-Switch.

### SW1 (Ganho)

O *Switch 1* permite selecionar o ganho que se pretende obter, ou seja, permite saber qual a amplificação de entrada.

Através das especificações da célula de carga pode verificar-se que a sua sensibilidade é 4,32786 mV/V, e assim, de acordo com a figura 45 verifica-se a posição dos pinos para a configuração do ganho.

27 2.49 mV/V	28 2.63 mV/V
1 2 3 4 5 6 7 8	1 2 3 4 5 6 7 8
↑ ↑ ↓ ↓ ↑ ↑ ↑ x	↓ ↑ ↑ ↓ ↓ ↓ ↓ x
31 3.19 mV/V	32 3.35 mV/V
1 2 3 4 5 6 7 8	1 2 3 4 5 6 7 8
↓ ↓ ↑ ↓ ↓ ↓ ↓ x	↑ ↓ ↓ ↑ ↑ ↑ ↑ x
35 3.73 mV/V	36 4.00 mV/V
1 2 3 4 5 6 7 8	1 2 3 4 5 6 7 8
↓ ↑ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ x	↑ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ x
39 4.26 mV/V	40 4.36 mV/V
1 2 3 4 5 6 7 8	1 2 3 4 5 6 7 8
↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ x	↓ ↑ ↑ ↓ ↑ ↑ ↑ x
43 5.12 mV/V	44 5.34 mV/V
1 2 3 4 5 6 7 8	1 2 3 4 5 6 7 8
↑ ↑ ↓ ↓ ↑ ↑ ↑ x	↓ ↑ ↓ ↓ ↑ ↑ ↑ x

Figura 45 – Tabela de configurações SW1.

Na figura 45 constata-se que existe uma configuração tabelada de 4,36 mV/V, o que seria uma possível solução, mas como a célula é de 5 klbf e a rede de ar comprimido só disponibiliza aproximadamente 6 bar de pressão, concluiu-se que a configuração de 3,19 mV/V seria aceitável. Esta possibilita um aumento da faixa de amostragem, ou seja, permite aumentar o ganho e possuir uma gama de amostras para a gama de pressão disponível.

Assim, pode ser determinado o ganho do condicionador de sinal:

- Sabe-se que:

$$V_{\text{entrada}} = \frac{3,19 \text{ mV}}{V} \times 10V = 31,9 \text{ mV (Eq. 2)}$$

- e:

$$31,9 \text{ mV} = 0,319 \text{ V (Eq. 3)}$$

- Então:

$$\text{Ganho} = \frac{V_{\text{saída}}}{V_{\text{entrada}}} = \frac{10 \text{ V}}{0,319 \text{ V}} = 313,48 \text{ (Eq. 4)}$$

### SW3 (Filtros)

Para a configuração do *Switch 3* foi selecionado, através da figura 46, um filtro de 5 kHz que tem como função filtrar algum ruído que possa existir no sinal.



SW3	1	2	3	4	5	6	7	8
1Hz	0 ↓	0 ↓	0 ↓	0 ↓	0 ↓	0 ↓	1 ↑	1 ↑
5Hz	1 ↑	0 ↓	0 ↓	0 ↓	0 ↓	1 ↑	1 ↑	1 ↑
10Hz	1 ↑	1 ↑	0 ↓	0 ↓	1 ↑	1 ↑	1 ↑	1 ↑
50Hz	1 ↑	1 ↑	1 ↑	1 ↑	1 ↑	1 ↑	1 ↑	1 ↑
100Hz	0 ↓	0 ↓	0 ↓	0 ↓	0 ↓	0 ↓	0 ↓	0 ↓
500Hz	1 ↑	0 ↓	0 ↓	0 ↓	0 ↓	1 ↑	0 ↓	0 ↓
800Hz	see note**							
1kHz	1 ↑	1 ↑	0 ↓	0 ↓	1 ↑	1 ↑	0 ↓	0 ↓
5kHz	1 ↑	1 ↑	1 ↑	1 ↑	1 ↑	1 ↑	0 ↓	0 ↓

Figura 46 – Tabela de configurações SW3.

SW4 (Configuração de *output*)

Nas condições de saída do sinal, foi selecionado, através da figura 47, um sinal à entrada do condicionador de sinal.

Analogue Output Options - SW4								
SW4	1	2	3	4	5	6	7	8
±10V	0↓	0↓	0↓	X	X	1=Filter	1=No Filter	X
±5V	0↓	1↑	0↓	X	X	1=Filter	1=No Filter	X
0-10V	0↓	1↑	1↑	X	X	1=Filter	1=No Filter	X
0-5V	1↑	1↑	1↑	X	X	1=Filter	1=No Filter	X
0-20mA	X	X	X	0↓	0↓	1=Filter	1=No Filter	X
4-20mA	X	X	X	1↑	1↑	1=Filter	1=No Filter	X
Filter out	X	X	X	X	X	0↓	1↑	X
Filter in	X	X	X	X	X	1↑	0↓	X

Figura 47 – Tabela de configurações SW4.

### 3.5.2. SISTEMA DE LIGAÇÕES

A figura 48 apresenta o sistema de ligações realizado para ligar o condicionador de sinal, no qual a alimentação é efetuada no *Jumper 5*; no *Jumper 1* dá-se a saída do sinal amplificado proveniente da célula de carga.

O *Jumper 2* corresponde ao local onde é ligada a célula de carga, no qual os dois primeiros canais são de excitação de 10 V da célula, e os outros dois canais correspondem ao sinal que é enviado da célula.

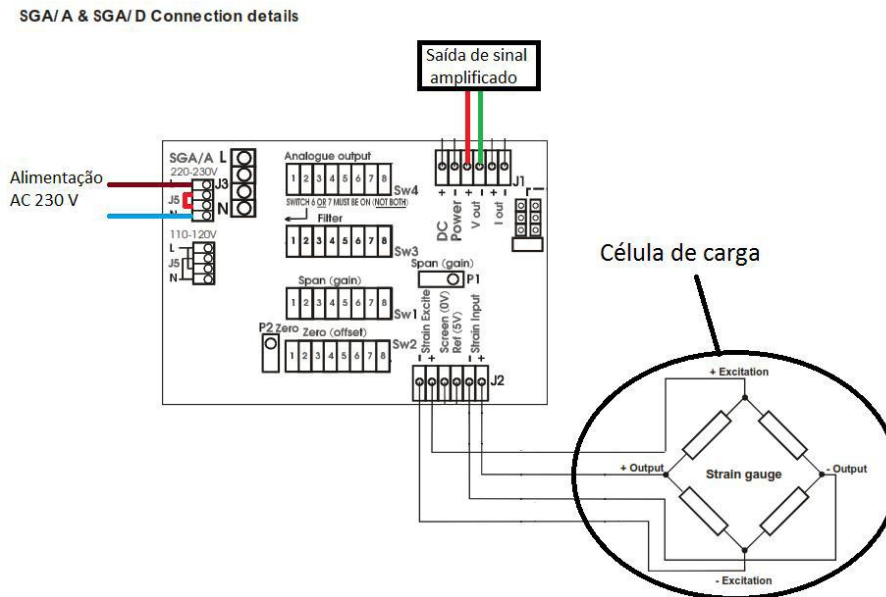


Figura 48 – Esquema de ligações do condicionador de sinal.

Como se pode observar na figura 49 o sinal que sai do condicionador liga diretamente ao *pinout* da placa de aquisição, nomeadamente  $V_{out+}$  ao *pinout* 68 e o  $V_{out-}$  ao *pinout* 34. Foi inserida uma resistência de 25 k entre o *pinout* 34 e o 67, para efetuar a redução do ruído partilhando assim as mesmas massas.

A ligação da placa ao controlador foi efetuada através dos *pinouts* 22 e 56, dos quais o 22 irá gerar os sinais elétricos para o controlador e o 56 está ligado à fonte de alimentação.

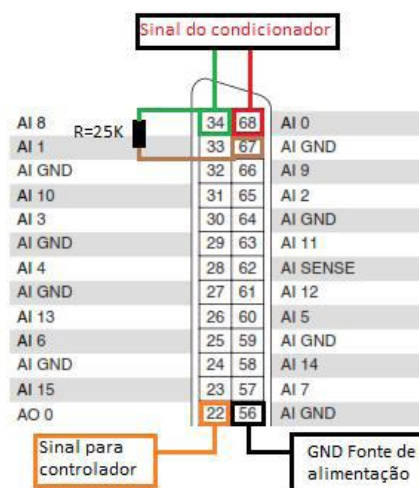


Figura 49 – *Pinouts* da placa de aquisição.

O controlador pneumático irá ser alimentado por uma fonte em que o fio azul se encontra ligado ao positivo da fonte, o castanho à massa e o branco ao *pinout* 22 (figura 50).

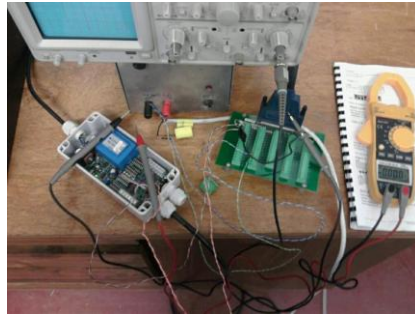


Figura 50 – Ligações dos equipamentos.

### 3.5.3. CALIBRAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA

Depois de efetuado o acondicionamento de sinal e a ligação de todos os componentes, será possível, manualmente ou através da aplicação *Measurement Automation*, aplicar uma força enviando um sinal elétrico ao controlador. Assim, obtém-se um outro sinal proveniente da célula de carga.

Como há necessidade de interpretar estes sinais, realiza-se a calibração da célula de carga através de uma equação linear que descreve o comportamento da célula. Para a calibrar uma célula, geralmente, utiliza-se um atuador, podendo este ser hidráulico ou pneumático e uma célula já calibrada.

A calibração executa-se com uma célula em série com outra e vão-lhes sendo aplicadas forças. Com os valores de força e com as leituras provenientes da célula a calibrar determina-se a curva de calibração da célula.

No caso em questão, a célula de carga trazia em anexo um teste de carga efetuado (Anexo D), o que fez com que fosse mais fácil determinar a curva de calibração da célula apresentada na figura 51.

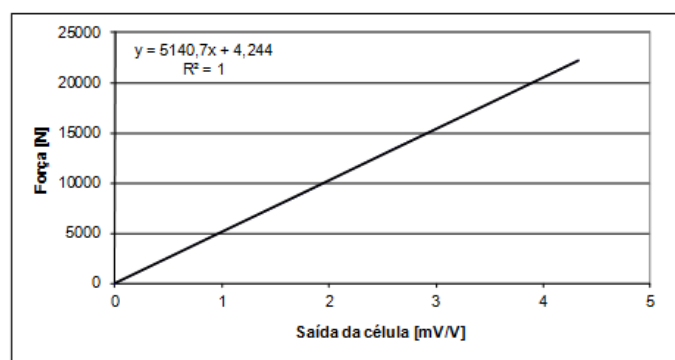


Figura 51 – Gráfico de calibração da célula de carga.

Através da figura 51 obtém-se a equação que traduz o comportamento da célula quando sujeita à variação de carga:

$$y = 5140,7x + 4,244 \text{ (Eq.5)}$$

Em que:

y – Tensão de saída do sinal amplificado (V);

x – Carga em *Newton* (N).

### 3.5.4. CALIBRAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA INCLUINDO O SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE SINAL

Depois da calibração da célula foi necessário efetuar a calibração da célula de carga incluindo o sistema de condicionamento de sinal. Para obter esta curva de calibração, foi necessário efetuarem-se os seguintes cálculos:

- Sabe-se que:

$$5 \text{ klbf} \rightarrow 4,32786 \text{ mV/V}$$

- E que:

$$\text{Tensão de alimentação} = 10 \text{ V}$$

- Logo:

$$5 \text{ klbf} \rightarrow 4,32786 \times 10 = 43,2786 \text{ mV (Eq.6)}$$

- Multiplicando o valor anterior pelo ganho calculado na Eq. 4:

$$5 \text{ klbf} \rightarrow 43,2786 \times 313,48 = 13566,9755 \text{ mV (Eq. 7)}$$

- Sabe-se que:

$$1 \text{ lb} = 452 \text{ g}$$

- Assim:

$$5 \text{ lb} \times 452 \text{ g} = 2260 \text{ N} = 2,26 \text{ kf} \times 9,81 = 22,1706 \text{ kN} = 22170,6 \text{ N (Eq.8)}$$

- Conclui-se que:

$$22170,6 \text{ N} \rightarrow 13,566 \text{ V}$$

- Por isso:

$$1 \text{ V} = \frac{22170,6}{13,566} \approx 1634 \text{ (Eq. 9)}$$

Depois da obtenção da equação 9 é possível calcular os valores até aos 10 V e assim determinar a curva de calibração representada na figura 52.

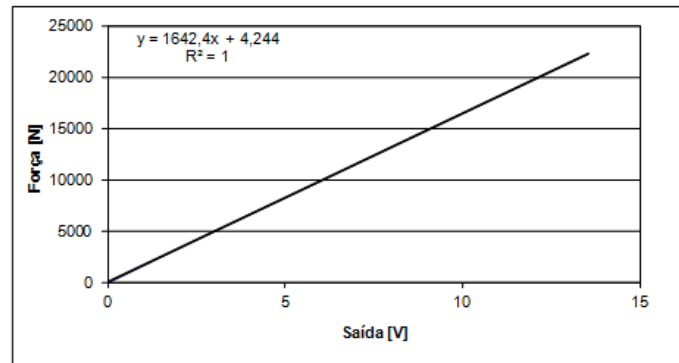


Figura 52 – Gráfico de calibração da célula de carga incluindo o sistema de condicionamento de sinal.

### 3.5.5. DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE

#### • Painel frontal

O controlo do equipamento desenvolvido será realizado através do editor *LabVIEW®* que permite criar um programa que facilite o controlo dos equipamentos e também a definição de alguns parâmetros, tais como, carga mínima, carga máxima, frequência, tempo de estágio, entre outros.

Como se pode verificar na figura 53 foi desenvolvido um painel frontal onde se tem presente alguns dos parâmetros referidos anteriormente.

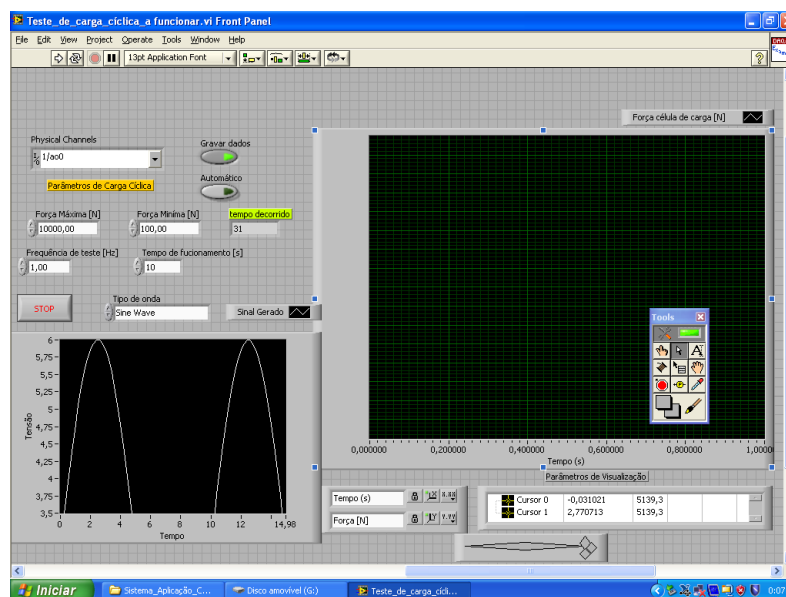


Figura 53 – Painel frontal do *software* de controlo desenvolvido.

- **Diagrama de blocos**

Para a elaboração deste *software* de controlo foram utilizados vários diagramas de blocos.

- **Diagrama de blocos do gerador de sinal:**

Este diagrama (figura 54) tem como função permitir a geração de ondas sinusoidais que vão alimentar o controlador, e também atuar sobre o atuador pneumático de forma cíclica.

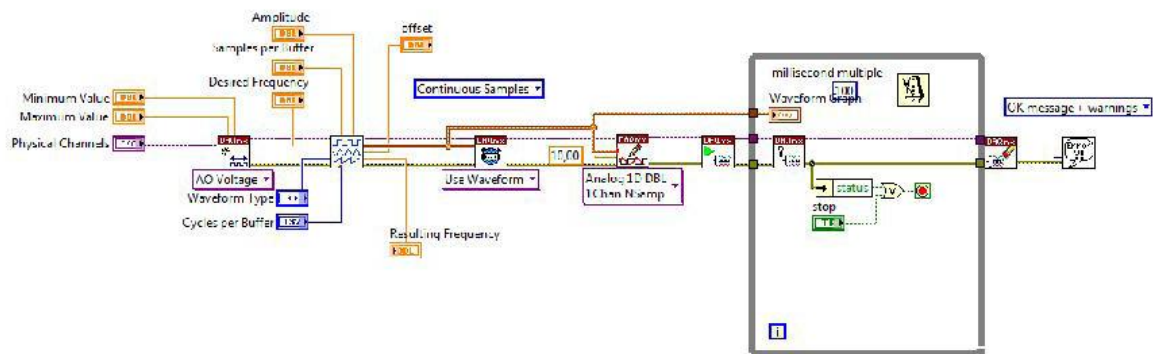


Figura 54 – Diagrama de blocos do gerador de sinal.

- **Diagrama de blocos de aquisição de sinal:**

Na figura 55, está representado o diagrama onde se encontram representadas as funções para a aquisição de dados provenientes da célula de carga.

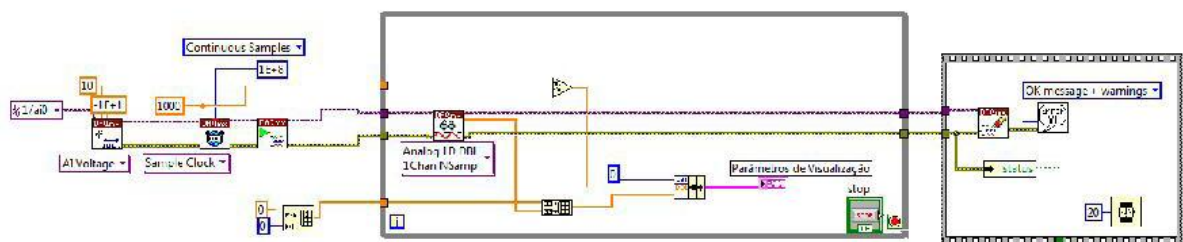


Figura 55 – Diagrama de blocos de aquisição de sinal.

**Sumário:** Neste capítulo foram abordados os vários sistemas constituintes do equipamento e a seleção dos componentes dos mesmos (sistema de aplicação de carga, sistema de medição e sistema de comando e controlo). Apresenta-se também, a montagem do sistema de comando e controlo.

Para que o funcionamento deste sistema fosse o esperado, criou-se um programa através de diagramas de blocos, que efetua o controlo do funcionamento do equipamento, bem como das variáveis referidas nas especificações.

Por fim, tem-se uma breve explicação de todas as ligações elétricas realizadas na montagem do sistema de comando e controlo.

No Anexo A e B estão apresentados os catálogos dos componentes selecionados para o sistema de aplicação de carga e sistema de medição.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

Neste capítulo será apresentado um protocolo para a realização dos ensaios, assim como os resultados obtidos da realização dos mesmos e, por fim, uma breve discussão dos mesmos.

### 4.1. PROTOCOLO DE ENSAIO

Na realização dos ensaios foi importante elaborar um protocolo de ensaio para ter maior repetibilidade e reduzir ao máximo a possibilidade de ocorrência de erros.

Optou-se por dividir o protocolo de ensaio em 3 partes:

- A 1ª consiste nos passos a realizar antes da realização dos ensaios propriamente ditos;
- A 2ª refere todos os passos a seguir para a realização dos ensaios;
- A 3ª, e última, apresenta os passos a seguir para finalizar a sequência de testes.

1ª Fase do protocolo de ensaios:

1. Ligar a fonte de alimentação e o PC;
2. Na figura 56 apresenta a ligação da mangueira à saída do ar;



Figura 56 – Ligação da mangueira à saída de ar.

3. Colocar a válvula manual na posição *on*;



2ª Fase do protocolo de ensaios:

4. Iniciar o programa desenvolvido no editor *LabVIEW®*;
5. Introduzir a frequência pretendida, como na figura 57;

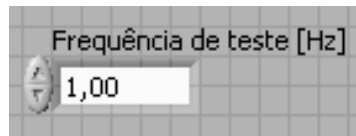


Figura 57 – Introdução da frequência.

6. Introduzir a carga que se quer aplicar, como na figura 58;



Figura 58 – Introdução da força.

7. Na figura 59 apresenta-se o símbolo a premir, o qual indica o início do ensaio;



Figura 59 – Símbolo de início de ensaio.

8. Obtenção de uma série de dados;
9. Abrir os dados com o *excel* e criar os gráficos correspondentes aos dados;
10. Guardar os gráficos para futura análise;

3ª Fase do protocolo de ensaios:

11. Desligar o computador;
12. Colocar a válvula manual na posição *off*;
13. A figura 60 mostra a mangueira solta da saída do ar comprimido;



Figura 60 – Mangueira de ar solta.

14. Desligar a fonte de alimentação;

## *4.2. REALIZAÇÃO DE ENSAIOS SISTEMÁTICOS*

Na realização dos ensaios teve-se em conta a influência de três variáveis, como a altura de trabalho do atuador, a frequência e a força.

Com estes ensaios o que se pretende é saber a frequência máxima a aplicar para a obtenção de amplitude máxima.

### *4.2.1. VARIAÇÃO DE ALTURA DE TRABALHO DO ATUADOR*

Como foi referido em 3.1. o fabricante do atuador define  $h_1 = 110$  mm, como a altura de trabalho ideal para o atuador, e a altura de trabalho mínima  $h_2 = 51$  mm.

Para este estudo utilizou-se um intervalo de alturas entre a altura de trabalho ideal e altura mínima (entre  $h_1$  e  $h_2$ ). Seguindo este intervalo, optou-se por estabelecer uma variação de altura de 10 em 10 mm.

Nesta condição as alturas ( $h$ ) de trabalho estabelecidas para o atuador nestes ensaios foram:

Tabela 2 - Tabela com as alturas de trabalho estabelecidas para os ensaios.

h (mm)
110
100
90
80
70
60

#### 4.2.2. *VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIA*

No início deste projeto foram transmitidas algumas especificações que este forno terá de cumprir. Dentro destas, a gama de frequências que se pretende que o forno trabalhe, sendo esta, de 0,5 a 5 Hz.

Desta forma optou-se por se realizar ensaios para as frequências:

Tabela 3 - Tabela com as frequências utilizadas nestes ensaios.

f (Hz)
0,5
1
2
3
4
5

#### 4.2.3. *VARIAÇÃO DE FORÇA*

A gama de forças a exercer foi, como a frequência, previamente definida. Segundo as especificações, a força a ser aplicada deverá ser cíclica e num intervalo entre 70 e 15000 N. Como nada foi dito em contrário, optou-se por dividir este intervalo

em vários, uma vez que este apresenta uma amplitude muito elevada e seria muito difícil, se não mesmo impossível, obter resultados válidos.

Assim, obtiveram-se os seguintes intervalos de força:

Tabela 4 - Tabela com os intervalos de força estabelecidos para realização dos ensaios.

F (N)
70 – 1000
1000 – 5000
5000 – 10000
10000 – 15000

### 4.3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Em função do capítulo anterior, no qual foram abordadas as diferentes variáveis, iremos ter subcapítulos onde se irão apresentar e discutir os resultados obtidos de acordo com os ensaios efetuados.

As gamas de forças referidas neste capítulo consistem em dados utilizados como *inputs*, pois os dados de saída apresentam valores superiores, isto porque existe um erro no software de controlo.

#### 4.3.1. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA ALTURA

Nas seguintes figuras será relatada a influência da altura do atuador nos ensaios realizados.

Pode-se observar na figura 61 que, para 90 mm de altura do atuador a 0,5 Hz, obtém-se a maior amplitude (aproximadamente 1200 N), como era espectável. No entanto existe demasiada vibração.

Para as alturas de 100 e 110 mm as amplitudes são, respetivamente, 1000 N e 900 N, as quais acusam menor vibração.

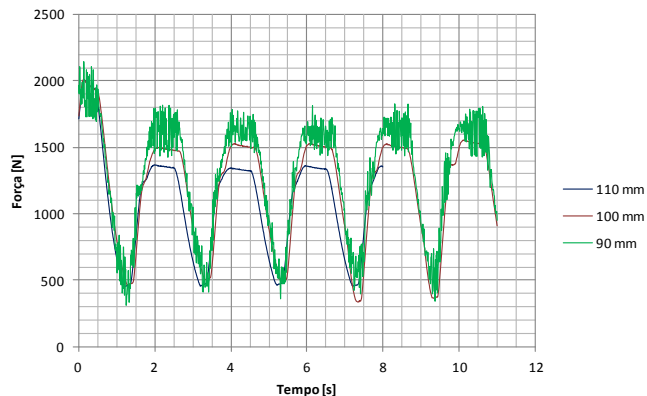


Figura 61 – Gráfico com a influência da altura no ensaio de 70-1000 N a 0,5 Hz.

Na figura 62 é possível verificar que, para 90 mm de altura do atuador, obteve-se muita vibração, como já se referiu anteriormente, e a amplitude a 1 Hz é apenas de 1000 N. Ou seja, conclui-se que a amplitude diminui com o aumento da frequência.

Observa-se que os gráficos para 100 e 110 mm são válidos. Contudo, após a análise, verifica-se que o gráfico mais adequado para as especificações colocadas é o de 100 mm de altura, pois é o que apresenta maior amplitude (1400 N).

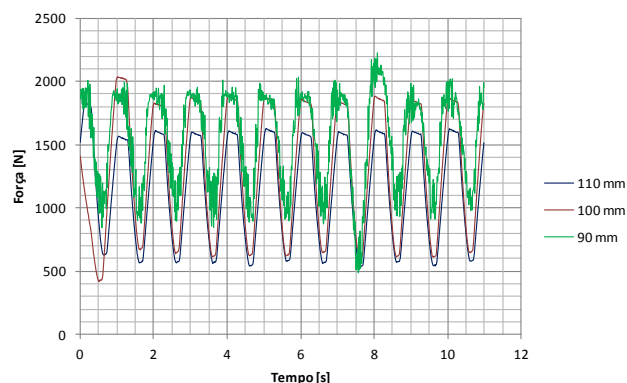


Figura 62 – Gráfico com a influência da altura no ensaio de 70-1000 N a 1 Hz.

Depois de uma breve análise da figura 63 pode-se concluir que, para uma frequência de 2 Hz a alturas menores, os gráficos não são válidos pois não obedecem ao critério da repetibilidade e não apresentam a forma de uma senoide.

Nesta figura só o gráfico para a altura de 110 mm é válido, pois este oferece uma amplitude de 300 N, mas mais importante que isso apresenta uma aplicação cíclica da carga.

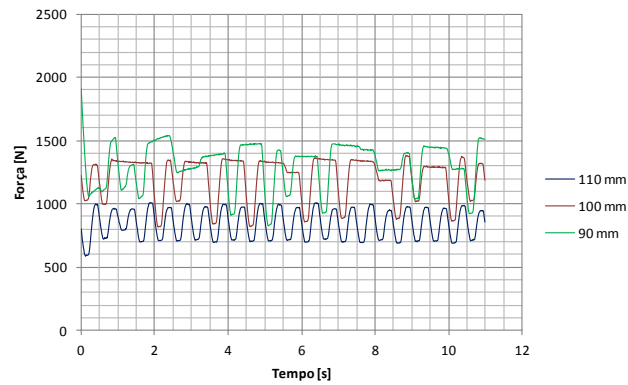


Figura 63 – Gráfico com a influência da altura no ensaio de 70-1000 N a 2 Hz.

A figura 64 apresenta 3 gráficos, os quais são perfeitamente válidos. O gráfico que apresenta maior amplitude (aproximadamente 6000 N) é o de 90 mm de altura do atuador, como seria de prever. Isto explica-se pois, como o atuador tem um tamanho reduzido, há menor quantidade de ar dentro dele, assim torna-se mais fácil a saída e entrada do mesmo o que vai permitir maior amplitude.

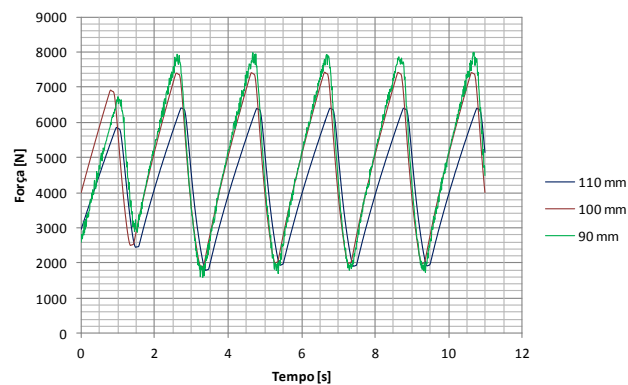


Figura 64 – Gráfico com a influência da altura no ensaio de 1000-5000 N a 0,5 Hz.

Na figura anterior (figura 65), apenas o gráfico para 90 mm se apresenta como válido, pois a carga é aplicada ciclicamente, o que não acontece com os restantes. Neste, pode verificar-se alguma vibração, mas ainda assim consegue-se uma amplitude de aproximadamente 2600 N.

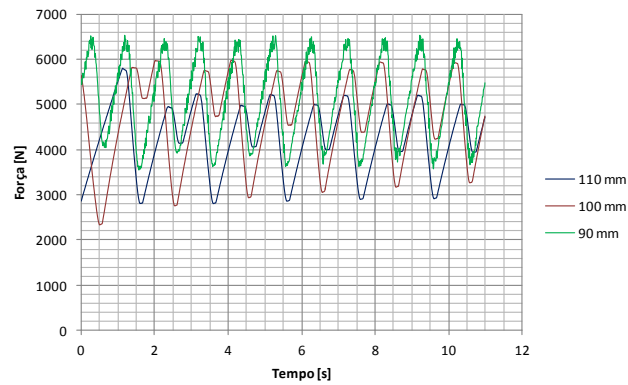


Figura 65 – Gráfico com a influência da altura no ensaio de 1000-5000 N a 1 Hz.

Na figura 66 pode-se verificar que todos os ensaios são válidos. Embora não haja uma diferença significativa de amplitude entre os 3 gráficos, conclui-se que a altura de 90 mm, como já se vem a verificar na maioria dos gráficos, é a que apresenta a maior amplitude.

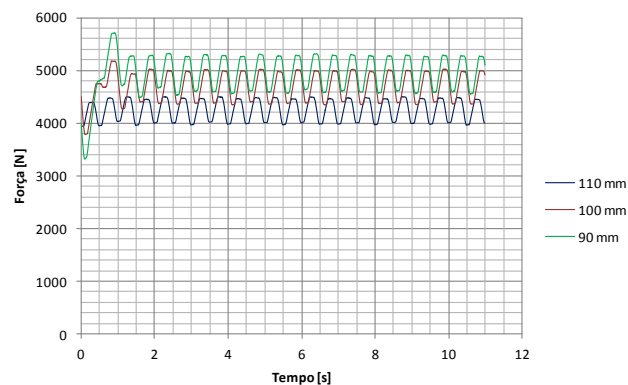


Figura 66 – Gráfico com a influência da altura no ensaio de 1000-5000 N a 2 Hz.

Como se pode verificar na figura 67, o atuador à altura de 90 mm apresenta maior amplitude (6100 N) que a 110 e 100 mm, como era espectável. Também se pode observar que 90 mm é a altura mínima que o atuador deve ter pois, como é visível já oferece alguma vibração. Esta, poderá ser resultado do sistema mecânico adotado.

Por outro lado, à altura de 100 mm verifica-se que, apesar de a amplitude não ser a maior (aproximadamente 5500 N), o gráfico apresenta-se mais estável o que faz desta a melhor solução.

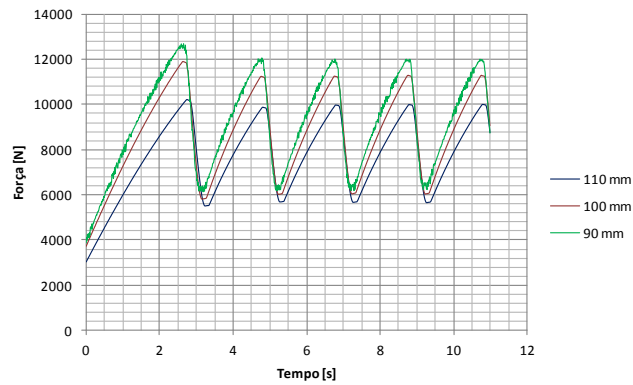


Figura 67 – Gráfico com a influência da altura no ensaio de 5000-10000 N a 0,5 Hz.

A figura anterior (figura 68) apresenta 3 gráficos, os quais não são válidos pois a carga neles aplicada não é cíclica.

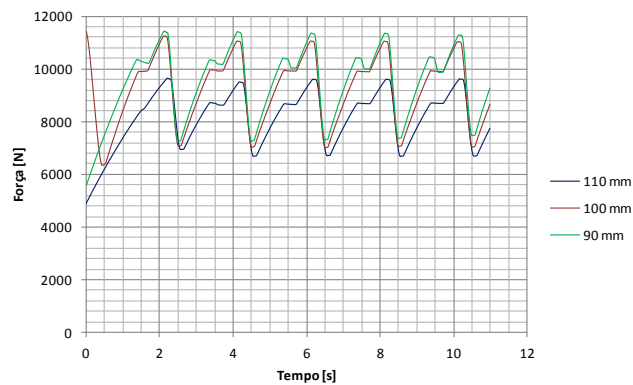


Figura 68 – Gráfico com a influência da altura no ensaio de 5000-10000 N a 1 Hz.

Na figura 69 verifica-se que existe pouca vibração em qualquer uma das alturas do atuador. Por outro lado, pode-se observar que a amplitude é demasiado pequena nos 3 gráficos, uma vez que a 2 Hz não há tempo suficiente para a entrada e saída de ar do atuador.

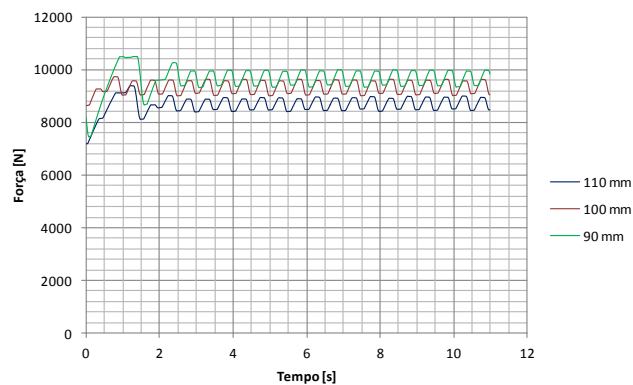


Figura 69 – Gráfico com a influência da altura no ensaio de 5000-10000 N a 2 Hz.



Na figura 70, é claro que a altura 90 mm apresenta problemas de vibração.

À altura de 100 mm consegue-se obter maior estabilidade e conduzir a uma amplitude de cerca de 3200 N.

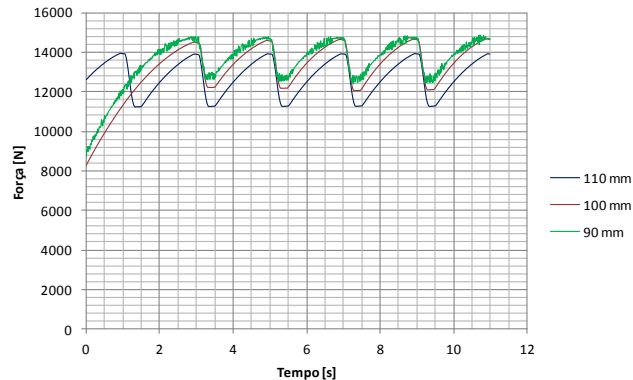


Figura 70 – Gráfico com a influência da altura no ensaio de 10000-15000 N a 0,5 Hz.

A figura 71 apresenta 3 gráficos dos quais nenhum é válido. Aqui certamente, existem problemas causados pelo facto das forças serem muito elevadas e por podermos estar perante o limite da rede.

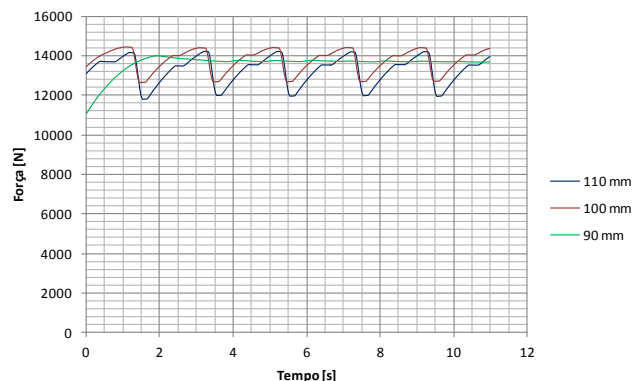


Figura 71 – Gráfico com a influência da altura no ensaio de 10000-15000 N a 1 Hz.

Anteriormente referiu-se que seriam realizados testes para as várias alturas do atuador incluindo 80, 70 e 60 mm. Como se pode verificar estes últimos não foram realizados, pois a montagem do sistema não permite. Com este tipo de montagem pode-se constatar que, para alturas do atuador inferiores a 90 mm, tem-se uma vibração acentuada do sistema. Isto deve-se ao facto do atuador possuir um grau de liberdade horizontal, o que faz com que a distribuição das forças não seja uniforme.

Na figura 72 comprova-se aquilo que foi referido anteriormente. Isto permite concluir que, o atuador a baixas alturas pode fazer com que o tubo que o liga à célula de carga se solte e assim provoque danos quer do equipamento quer do próprio operador.



Figura 72 – Atuador com altura de 70 mm.

#### 4.3.2. *ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA FORÇA*

Nas figuras seguintes, serão apresentados gráficos nos quais se pode verificar a influência que a força teve nos ensaios realizados.

Pode-se observar na figura 73, que apesar de com 90 mm de altura do atuador indiciar a maiores amplitudes tem-se demasiada vibração.

Através da análise da mesma figura pode-se concluir que a amplitude é maior para uma gama de forças entre 1000 e 10000 N.

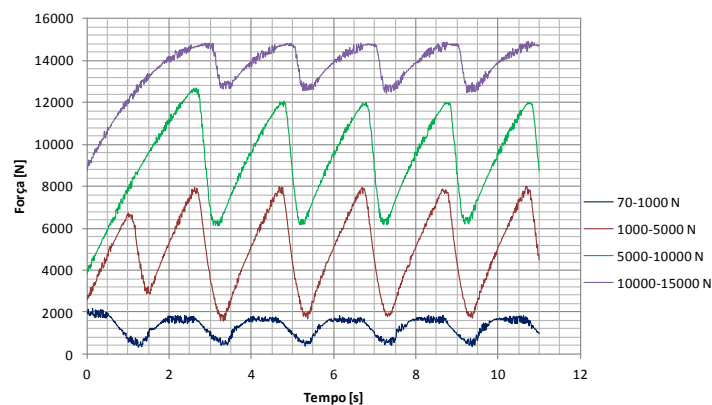


Figura 73 – Gráfico com a influência da força no ensaio para 0,5 Hz com 90 mm de altura do atuador.

Após a análise da figura 74, conclui-se que os gráficos apresentam maior regularidade e que conduzem a uma boa amplitude (cerca de 6000 N), numa gama de forças entre 1000 e 10000 N.

Pode-se ainda observar que, para forças muito elevadas, como é o caso do intervalo de 10000 a 15000 N, a amplitude diminui bruscamente para 2000 N.

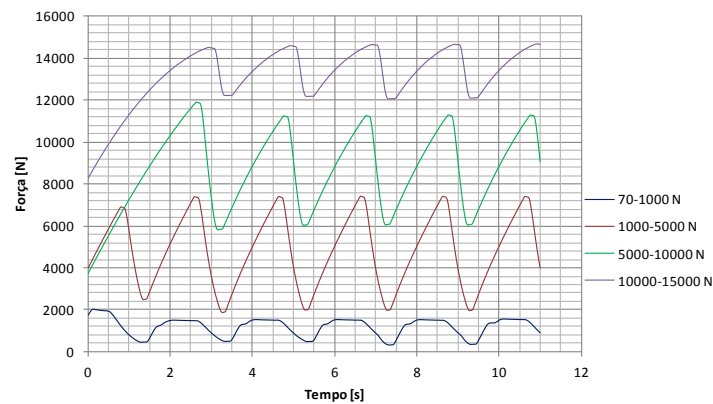


Figura 74 – Gráfico com a influência da força no ensaio para 0,5 Hz com 100 mm de altura do atuador.

Na figura 75, a melhor amplitude fixa-se no intervalo de forças entre 1000 e 10000 N, como se vem a verificar ao longo das análises dos gráficos.

Com esta altura conclui-se que, o sistema apresenta pouca vibração e permite obter uma amplitude de aproximadamente 5000 N.

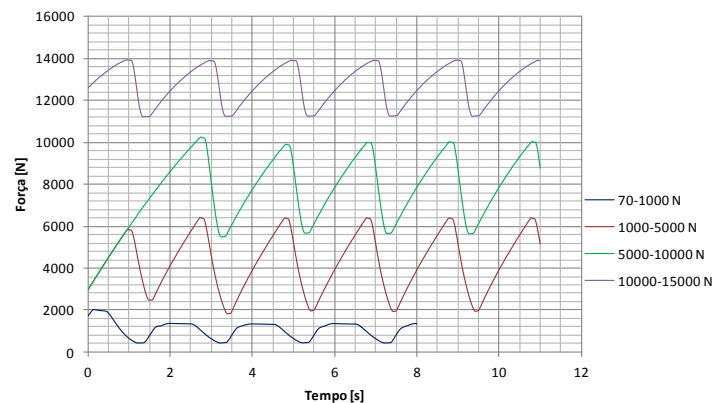


Figura 75 – Gráfico com a influência da força no ensaio para 0,5 Hz com 110 mm de altura do atuador.

Como se pode observar na figura 76, os gráficos apresentam menor vibração que os presentes na figura 73 para 0,5 Hz.

A amplitude que se pode obter é de cerca de 2500 N para a gama de forças de 1000 a 5000 N.

Pode-se concluir que, para gamas de forças superiores à anteriormente referida, os gráficos não são válidos, ou seja, os resultados começam a ser deturpados.

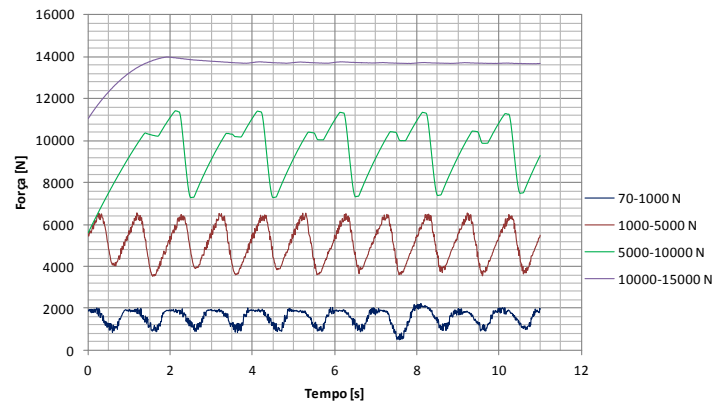


Figura 76 – Gráfico com a influência da força no ensaio para 1 Hz com 90 mm de altura do atuador.

Através da visualização da figura 77 conclui-se que só para a gama de 70-1000 N se tem um ensaio válido. Este permite obter uma amplitude de aproximadamente 1500 N.

Os restantes gráficos não apresentam aplicação de carga de forma cíclica, por isso não são considerados como válidos.

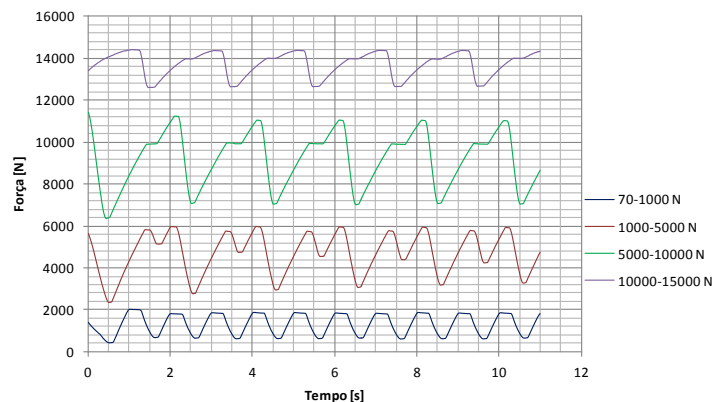


Figura 77 – Gráfico com a influência da força no ensaio para 1 Hz com 100 mm de altura do atuador.

Na figura 78 pode-se verificar que, 1 Hz é uma frequência muito elevada e que para forças de gamas elevadas (como entre 1000 e 15000 N) não se obtém gráficos válidos.

A amplitude máxima que se pode obter é de cerca de 1000 N para uma gama de forças entre 70 e 1000 N.

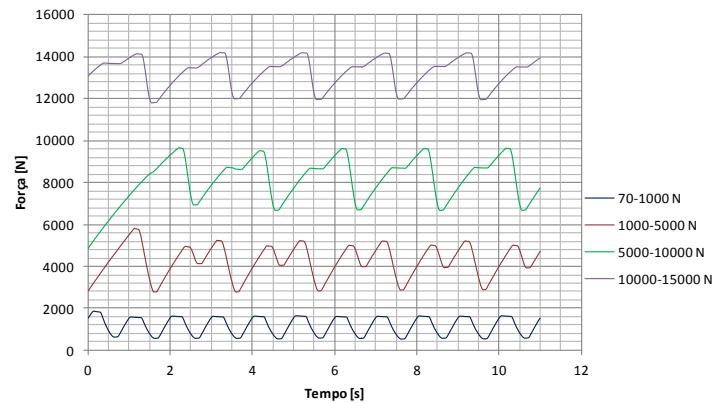


Figura 78 – Gráfico com a influência da força no ensaio para 1 Hz com 110 mm de altura do atuador.

A figura 79 mostra que para 2 Hz com o atuador com uma altura de 90 mm, não se consegue obter mais do que 500 N de amplitude. E isto, só se verifica para uma gama de forças entre 1000 e 10000 N.

Para gamas de forças demasiado baixas verifica-se que o gráfico não é válido. Isto acontece porque a força mínima (70 N) é muito próxima de 0 N.

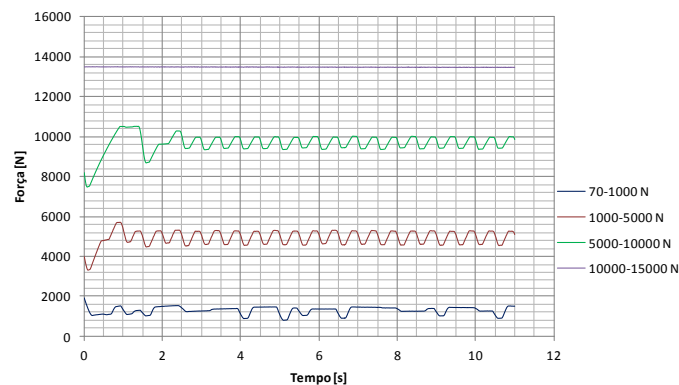


Figura 79 – Gráfico com a influência da força no ensaio para 2 Hz com 90 mm de altura do atuador.

Da análise da figura anterior (figura 80) conclui-se que, a amplitude para a altura do atuador de 100 mm é de aproximadamente 500 N, ou seja, igual à obtida com o atuador a 90 mm e para a mesma gama de forças.

Assim, é possível verificar que para 2 Hz, a diminuição da altura de 100 para 90 mm não foi de todo vantajosa.

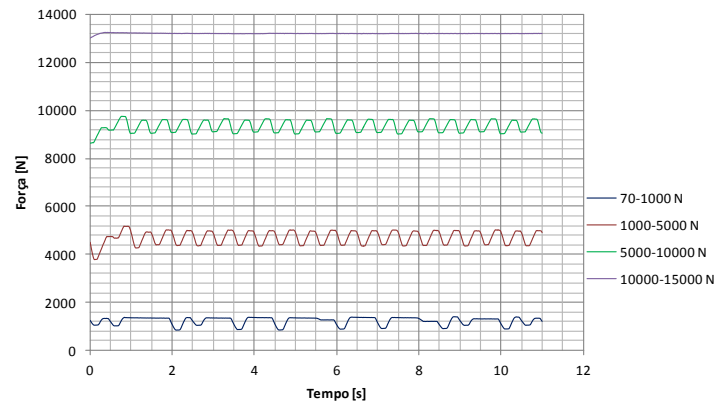


Figura 80 – Gráfico com a influência da força no ensaio para 2 Hz com 100 mm de altura do atuador.

Na figura 81 pode-se analisar que 3 dos 4 gráficos são válidos. Para a gama e forças entre 1000-10000 N tem-se uma amplitude de cerca de 500 N, o que se já se vem a verificar em todos os gráficos de influência de força para 2 Hz.

Para a gama de forças mais baixa (70-1000 N) conclui-se que a amplitude é demasiado pequena, sendo assim difícil precisar um valor.

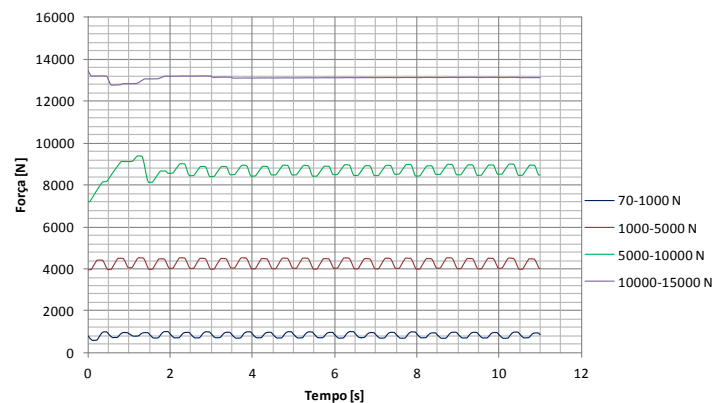


Figura 81 – Gráfico com a influência da força no ensaio para 2 Hz com 110 mm de altura do atuador.

### 4.3.3. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA FREQUÊNCIA

Nos gráficos apresentados de seguida, pode-se observar a influência da frequência nos ensaios efetuados.

Após análise do da figura 82 conclui-se que a amostra 70-1000 N não é muito representativa, pois como já foi referido anteriormente, como a força mínima é muito baixa o atuador fica muito solto o que vai permitir que este tenha maior vibração.

Esta figura é em tudo semelhante com as obtidas para as alturas de 100 e 110 mm. Assim, optou-se por não se colocar essa informação uma vez que a sua representação e comentário seriam idênticos.

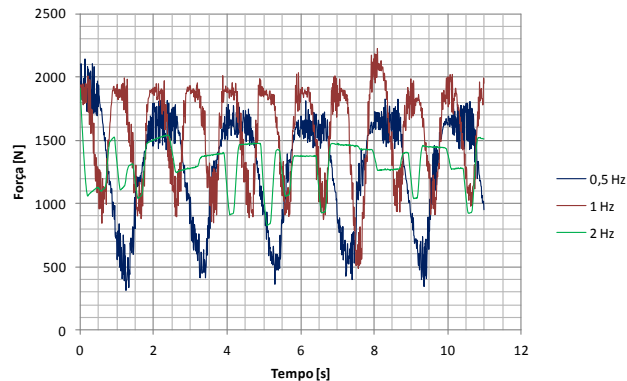


Figura 82 – Gráfico com a influência da frequência no ensaio de 70-1000 N com a altura do atuador de 90 mm.

Na figura 83 pode-se verificar que, como era espectável, para 0,5 Hz obtém-se maior amplitude (cerca de 6000 N de amplitude) mas, por outro lado, apresenta demasiada vibração.

É notável que, para 1 Hz e 2 Hz há uma diminuição da amplitude como se previa.

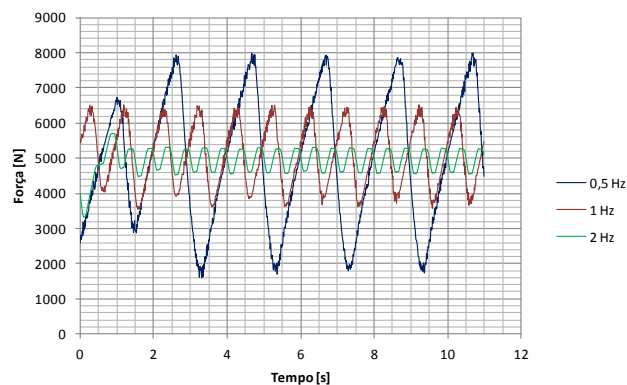


Figura 83 – Gráfico com a influência da frequência no ensaio de 1000-5000 N com a altura do atuador de 90 mm.

Pode-se concluir através da figura 84 que para uma frequência de 0,5 Hz obtemos a maior amplitude (5500 N), o que já se vem a verificar.

O gráfico que representa a frequência de 1 Hz não é válido pois a aplicação de carga não é cíclica, logo não apresenta repetibilidade.

A 2 Hz verifica-se que a amplitude diminui significativamente para 500 N e que o sinal é limpo (sem vibração).

Após a análise da figura para 110 mm de altura do atuador optou-se por não apresentar esta informação, pois a sua representação e comentário seriam idênticos ao da figura 84.

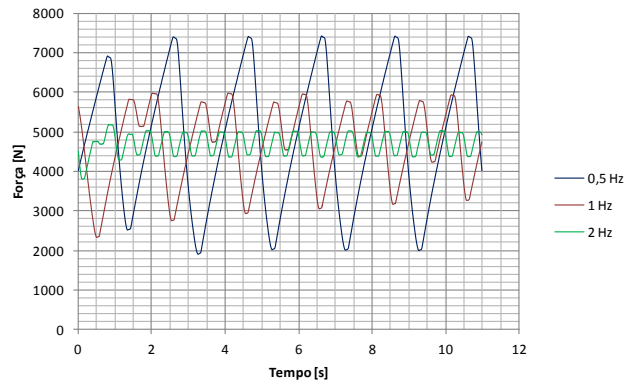


Figura 84 – Gráfico com a influência da frequência no ensaio de 1000-5000 N com a altura do atuador de 100 mm.

Na figura 85 observa-se que para 1 Hz o gráfico não é válido, visto que mais uma vez não apresenta carga cíclica.

Para a frequência de 0,5 Hz obteve-se uma amplitude de aproximadamente 6100 N, o que representa a maior amplitude obtida.

O gráfico de 2 Hz apresenta uma diminuição significativa da amplitude para aproximadamente de 500 N.

Após análise da figura de 100 e 110 mm de altura do atuador optou-se por não colocar essa mesma informação, uma vez que, a sua representação e comentário seriam idênticos aos da figura 85.

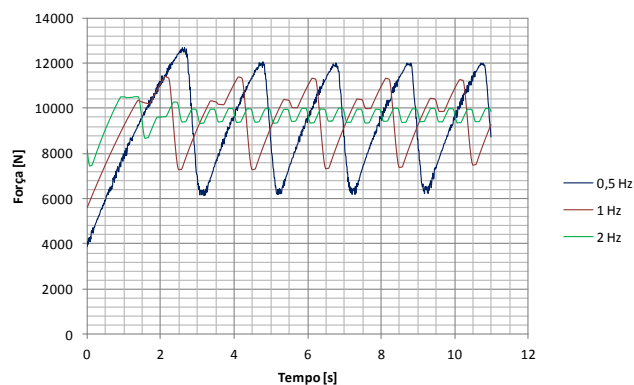


Figura 85 – Gráfico com a influência da frequência no ensaio de 5000-10000 N com a altura do atuador de 90 mm.



Como é possível verificar na figura 86, só se obteve um gráfico válido para 0,5 Hz, embora este apresente alguma vibração, pois estamos perante uma altura muito pequena do atuador. Conseguiu-se assim obter uma amplitude de 2000 N.

Os gráficos para 1 e 2 Hz não são válidos, por isso não se pode realizar uma análise.

Após análise da figura de 100 e 110 mm de altura optou-se por não colocar essa informação, uma vez que a sua representação e comentário seriam idênticos aos da figura 86.

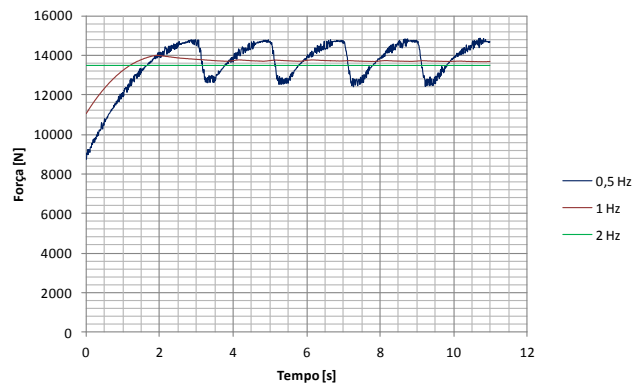


Figura 86 – Gráfico com a influência da frequência no ensaio de 10000-15000 N com a altura do atuador de 90 mm.

#### 4.3.4. CONCLUSÕES DA DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Uma vez analisados os gráficos presentes nas figuras anteriores, conclui-se que os parâmetros com melhores resultados foram os apresentados na tabela 5.

Tabela 5 – Conjunto de tabelas com os valores ótimos assinalados.

h (mm)	f (Hz)	F (N)	h (mm)	f (Hz)	F (N)	h (mm)	f (Hz)	F (N)
110	0,5	70-1000	100	0,5	70-1000	90	0,5	70-1000
		1000-5000			1000-5000			1000-5000
		5000-10000			5000-10000			5000-10000
		10000-15000			10000-15000			10000-15000
	1	70-1000		1	70-1000		1	70-1000
		1000-5000			1000-5000			1000-5000
		5000-10000			5000-10000			5000-10000
		10000-15000			10000-15000			10000-15000
	2	70-1000		2	70-1000		2	70-1000
		1000-5000			1000-5000			1000-5000
		5000-10000			5000-10000			5000-10000
		10000-15000			10000-15000			10000-15000
		Altura otima						
		Frequência otima						
		Gama de forcas otima						

Depois de realizada uma breve análise à tabela 5 conclui-se que os parâmetros para os quais se obtiveram os melhores resultados foram:

- **Altura do atuador de 100 mm**, pois apesar de não apresentar a maior amplitude, apresenta-se mais estável, ou seja menor vibração;
- **Gama de forças ideal encontra-se entre 1000 e 10000 N**, pois é para estes valores que se obtém a maior amplitude (aproximadamente 6000N);
- **Frequência do ensaio é de 0,5Hz**, pois é nesta que se verifica a maior amplitude.

Assim, fizeram-se testes fixando-se a altura de 100 mm do atuador e a frequência de 0,5 Hz variando a força de 1000 a 10000 N obtendo-se assim o gráfico da figura 87.

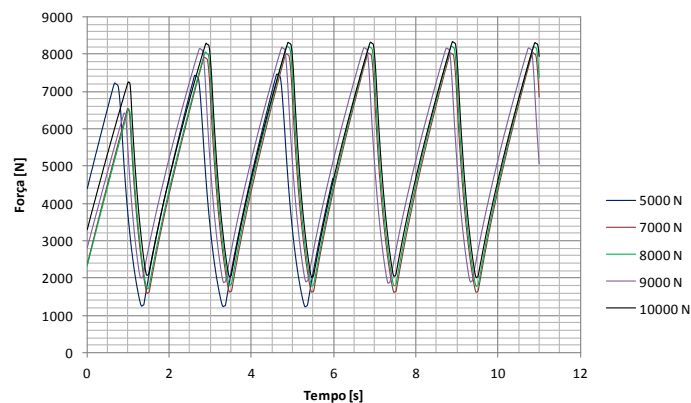


Figura 87 – Gráfico da amplitude máxima para os parâmetros otimizados.

A figura 87 mostra que a amplitude máxima obtida otimizando a frequência e a altura do atuador é de 6400 N para uma força aplicada de 7000 N.

Pode-se concluir que a 7000 N se atinge o limite de amplitude, pois a partir desse valor de força a amplitude mantém-se.

#### 4.3.5. *VALIDAÇÃO TEÓRICA DOS RESULTADOS*

De seguida, serão efetuados cálculos que permitam validar os resultados obtidos. Estes irão permitir concluir se os resultados obtidos são os únicos possíveis ou, se por ventura, seria possível obter melhores resultados.

Através destes cálculos poder-se-á também concluir se existem muitas perdas na instalação ou se esta funciona corretamente.

- Sabe-se que,

$$V_{\text{inicial}} = 2,3 \text{ l}$$

$$P_{\text{máx}} = 2,97 \text{ bar}$$

$$P_{\text{min}} = 0,62 \text{ bar}$$

$$0,5 \text{ Hz} = 2 \text{ s}$$

$$Q_{\text{controlador}} = 1500 \text{ l/min}$$

- E que,

$$V_{\text{retirado}} = (P_{\text{máx}} - P_{\text{min}}) \times V_{\text{inicial}}$$

- Assim,

$$V_{\text{retirado}} = (2,97 - 0,62) \times 2,3 = 5,40 \text{ l (Eq.10)}$$

- Então se,

$$0,5 \text{ Hz} = 2 \text{ s}$$

$$Q_{\text{controlador}} = 1500 \text{ l/min}$$

- Tem-se que,

$$Q_{\text{controlador}} = \frac{1500}{60} = 25 \text{ l/s (Eq.11)}$$

Assim conclui-se que, se  $V_{\text{retirado}} = 5,40 \text{ l}$  e se o  $Q_{\text{controlador}} = 25 \text{ l/s}$ , existem imensas perdas de carga no sistema. Essas perdas de carga são as principais responsáveis pelos resultados obtidos.

Também se pode verificar que, a pressão máxima da rede é aproximadamente 6 bar e trabalhamos apenas com um máximo de 2,97 bar. Assim, nunca se conseguirá obter o máximo que a rede nos dá, ou seja, os resultados não podem ser os pretendidos.

**Sumário:** No decorrer do capítulo 4 abordaram-se os resultados obtidos nos ensaios efetuados.

Para obtenção dos resultados, foi necessário estabelecer um protocolo de ensaio para se obter repetibilidade e se possível eliminar possíveis erros.

Da realização dos ensaios, pretende-se saber a amplitude máxima que se pode ter bem como os melhores parâmetros. Assim, verificou-se que a amplitude máxima obtida foi de aproximadamente 6400 N e que os melhores parâmetros, tendo em conta os ensaios realizados, são: altura do atuador de 100 mm, para uma força de 7000 N e a frequência de ensaio de 0,5 Hz.

## 5. CONCLUSÕES

---

### 5.1. SUMÁRIO

Neste capítulo serão abordadas todas as elações retiradas da realização deste trabalho.

Serão também fornecidas várias sugestões, estas possíveis de serem indicadas como trabalhos futuros, com o intuito de otimizar o sistema, e assim, obter melhores resultados.

### 5.2. CONCLUSÕES

Inicialmente, foi possível concluir que os primeiros conceitos idealizados para a estrutura do equipamento não eram a solução mais adequada, pois não obedecia aos parâmetros de ergonomia recomendados, não apresentava resistência mecânica e a estrutura não estava otimizada quanto às suas dimensões físicas.

Depois de finalizado o estudo proposto conclui-se que o sistema mecânico adotado não foi o melhor. Este apresenta demasiada vibração no decorrer dos ensaios, pois o atuador possui um grau de liberdade horizontal e só deveria possuir vertical.

Em 4.2.1. visualiza-se que se iriam realizar ensaios para o atuador com as alturas 80, 70 e 60 mm, mas após existir tanta instabilidade a 90 mm, concluiu-se que para evitar danos no sistema e ao próprio operador, o melhor seria não se efetuarem os ensaios em cima referidos.

Verificou-se que a máxima amplitude obtida foi de aproximadamente 6400 N, quando aplicada uma força de 7000 N.

Por fim concluiu-se que os parâmetros ótimos de ensaio serão a altura do atuador de 100 mm, a gama de forças entre 1000 e 10000 N e a frequência de 0,5 Hz.

### 5.3. TRABALHOS FUTUROS

No decorrer dos trabalhos desenvolveram-se algumas sugestões como trabalhos futuros, tais como:

- Rever o sistema mecânico, pois este apresenta algumas lacunas capazes de influenciar os resultados obtidos.
- Utilização de um regulador de pressão com maior capacidade de caudal.
- Melhoramentos a nível do sistema de comando e controlo.
- Prever a utilização de outros tipos de atuadores de membrana (com diferentes dimensões do atualmente utilizado).
- Conseguir aumentar a frequência do sistema de aplicação de carga cíclica.

# REFERÊNCIAS

---

- [1] Yuan, X.J., Sheng, G.M., Qin, B., Huang, W.Z., Zhou, B. (2008). Impulse pressuring diffusion bonding of titanium alloy to stainless steel, in *Materials Characterization* 59 (2008) 930-936.
- [2] Seabra, E., Silva, L.F., Guedes, A., Barbosa, J. (2009). Projecto Mecatrónico de um Forno de vazio para Soldadura por Pressuring Diffusion Welding,” in *FIMEC'2009*.
- [3] Orhan, N., Aksoy, M., Eroglu, M. (1999). A new model for diffusion bonding and its application to duplex alloys, *Materials*, in *Materials Science and Engineering*. A271 (1999) 458-468.
- [4] Peteves, S., Ceccone, G., Paulasto, M., Stamos, V., Yvon, P. (1996). Joining Silicon Nitride to itself and to Metals, in *JOM* 48 (1996) 48-52.
- [5] Phesant, S., Haslegrave, C. (2005). *Bodyspace: Anthropometry, Ergonomics and The design of work*, 3<sup>rd</sup> Edition, Taylor and Francis, CRC Press.
- [6] Mital, A., Karwowski, W. (1991). *Workspace, equipment and tool design*. New York: Elsevier.
- [7] Konz, S., Johnson, S. (2007). *Work design: Occupational Ergonomics*. 7<sup>th</sup> Edition. Holcomb Hathaway, Publishers.
- [8] FESTO, (2011). Consultado em 11 de Março de 2011 de [http://xdki.festo.com/xdki/data/doc\\_ENUS/PDF/US/EB-EBS\\_ENUS.PDF](http://xdki.festo.com/xdki/data/doc_ENUS/PDF/US/EB-EBS_ENUS.PDF)
- [9] SMC, (2011). Consultado em 11 de Março de 2011 de [http://www.smc.eu/portal/NEW\\_EBP/14%29Air\\_Line\\_Equipment/14.6%29Pressur e\\_C\\_Equip/b%29ITV1-2-3000/ITV1\\_2\\_3000\\_PO.pdf](http://www.smc.eu/portal/NEW_EBP/14%29Air_Line_Equipment/14.6%29Pressur e_C_Equip/b%29ITV1-2-3000/ITV1_2_3000_PO.pdf)
- [10] Johnson, G., Jennings R. (2001). *LabVIEW Graphical Programming*. McGraw-Hill Professional Publishing, USA.
- [11] Mihura, B. (2001). *LabVIEW for Data Acquisition*, Prentice Hall PTR, USA.

# BIBLIOGRAFIA

---

1. Yuan, X.J., Sheng, G.M., Qin, B., Huang, W.Z., Zhou, B. (2008). Impulse pressuring diffusion bonding of titanium alloy to stainless steel, in *Materials Characterization* 59 (2008) 930-936.
2. Seabra, E., Silva, L.F., Guedes, A., Barbosa, J. (2009). Projecto Mecatrónico de um Forno de vazio para Soldadura por Pressuring Diffusion Welding,” in *FIMEC'2009*.
3. Orhan, N., Aksoy, M., Eroglu, M. (1999). A new model for diffusion bonding and its application to duplex alloys, *Materials*, in *Materials Science and Engineering*. A271 (1999) 458-468.
4. Peteves, S., Ceccone, G., Paulasto, M., Stamos, V., Yvon, P. (1996). Joining Silicon Nitride to itself and to Metals, in *JOM* 48 (1996) 48-52.
5. Phesant, S., Haslegrave, C. (2005). *Bodyspace: Anthropometry, Ergonomics and The design of work*, 3<sup>rd</sup> Edition, Taylor and Francis, CRC Press.
6. Mital, A., Karwowski, W. (1991). *Workspace, equipment and tool design*. New York: Elsevier.
7. Konz, S., Johnson, S. (2007). *Work design: Occupational Ergonomics*. 7<sup>th</sup> Edition. Holcomb Hathaway, Publishers.
8. Johnson, G., Jennings R. (2001). *LabVIEW Graphical Programming*. McGraw-Hill Professional Publishing, USA.
9. Mihura, B. (2001). *LabVIEW for Data Acquisition*, Prentice Hall PTR, USA.



# ANEXOS

## ANEXO A – CATÁLOGO DA FESTO

### Cilindros de fuelle EB

Hoja de datos



Fundón



- Ø - Diámetro  
145 ... 385 mm
- l - Carrera  
60 ... 230 mm



Datos técnicos generales						
Tamaño	145	165	215	250	325	385
Conexión neumática	G $\frac{1}{8}$	G $\frac{1}{4}$	G $\frac{3}{4}$	G $\frac{3}{4}$	G $\frac{1}{4}$	G $\frac{1}{4}$
Funcionamiento	Simple efecto					
Construcción	Fuelle redondo					
Tipo de fijación	Con rosca interior					
Posición de montaje	Indistinta					

Condiciones de funcionamiento y del entorno	
Fluido	Aire comprimido filtrado, lubricado o sin lubricar
Presión de funcionamiento [bar]	0 ... 8
Temperatura ambiente [°C]	-40 ... +70
Clase de resistencia a la corrosión <sup>1)</sup>	2

1) Clase de resistencia a la corrosión 2 según norma de Festo 940 070  
Válida para piezas expuestas a gran peligro de corrosión. Piezas exteriores en contacto directo con sustancias usuales en entornos industriales, tales como disolventes, detergentes o lubricantes, con superficies principalmente decorativas

Fuerzas [N]						
Tamaño	145	165	215	250	325	385
Cilindro de fuelle simple						
Relación fuerza/carrera	→ 4		→ 5			
Fuerza de reposición	200				300	
Cilindro de fuelle doble						
Relación fuerza/carrera	→ 6		→ 7			
Fuerza de reposición	200				300	

- Importante
- Los cilindros de fuelle únicamente deben avanzar hasta topar con una pieza; de lo contrario, deben estar provistos de topes en los finales de carrera, ya que de no ser así, la carga aplicada sobre el material de fuelle sería demasiado grande
- Para conseguir comprimir el cilindro elástico al máximo es necesario aplicar una fuerza de recuperación. En general, basta con el peso de la propia pieza desplazada
- La fuerza debe aplicarse en toda la superficie de la placa superior e inferior
- Antes de desmontar los cilindros de fuelle, es necesario purgar el aire
- La goma de los cilindros de fuelle no debe topar con otras piezas al estar en funcionamiento

Cilindros de fuelle EB

FESTO

Hoja de datos

Pesos [g]						
Tamaño	145	165	215	250	325	385
Cilindro de fuelle simple	900	1 200	2 000	2 300	4 100	5 800
Cilindro de fuelle doble	1 100	1 500	2 300	3 000	4 800	6 900

**Materiales**

Vista en sección



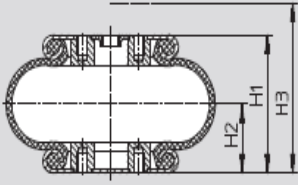
**Cilindros de fuelle**

1	Cuerpo	Acero cincado
2	Fuelle	Goma
-	Materiales	Sin cobre, PTFE ni silicona
-		Conformidad con RoHS

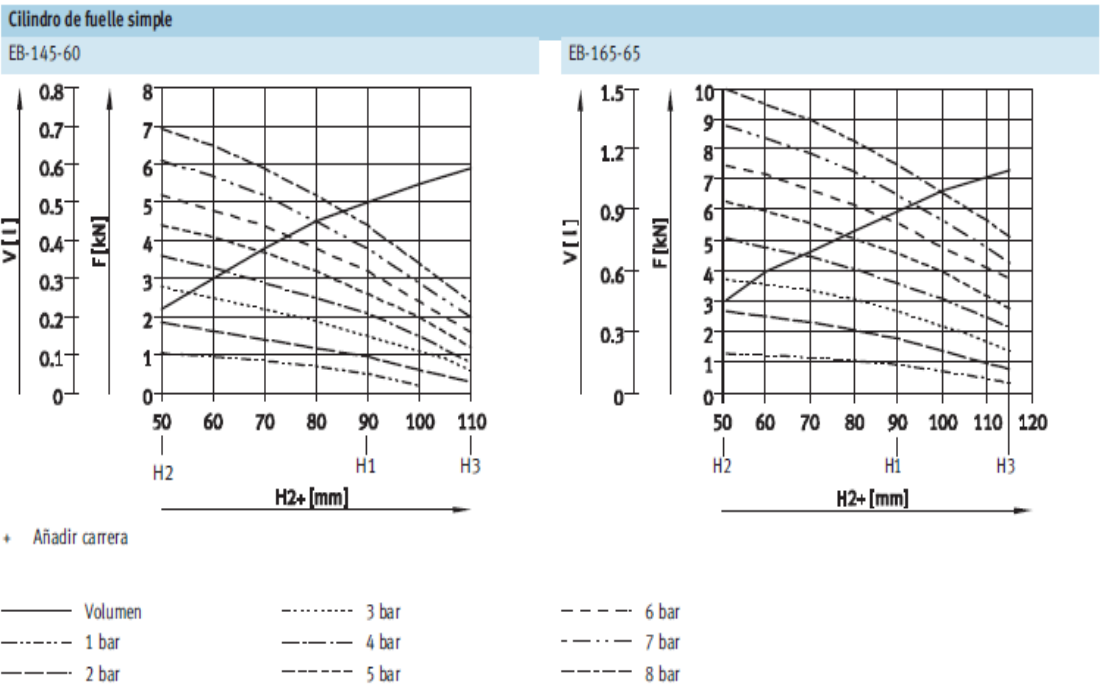
**Fuerza de avance F y volumen del fuelle V en función de la altura mínima H2 necesaria para el montaje + carrera**

El diagrama muestra el cambio de la fuerza de empuje F aplicando diversas presiones de funcionamiento y, además, el cambio del volumen V del fuelle. En ambos casos el cambio se

muestra en función de la carrera del cilindro. Para aprovechar las fuerzas al máximo es indispensable respetar la altura mínima de montaje H2.



H1 Altura de trabajo recomendada con amortiguación a 6 bar  
H2 Altura mínima para el montaje  
H3 Altura máxima con el fuelle extendido



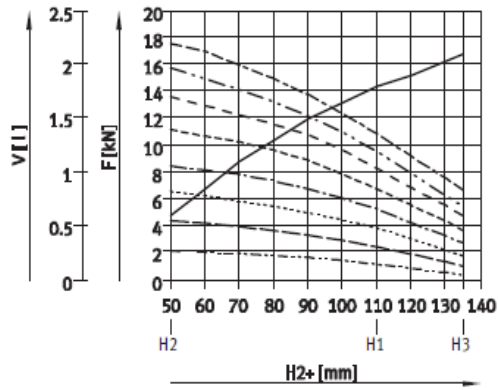
# Cilindros de fuelle EB

Hoja de datos

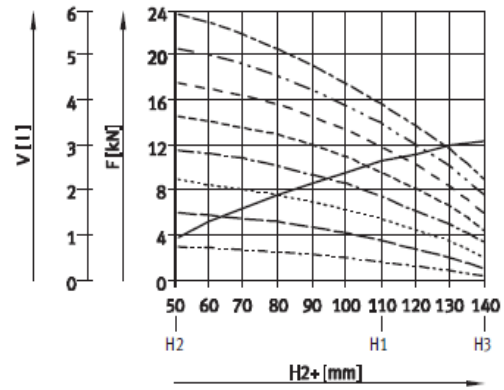
FESTO

## Cilindro de fuelle simple

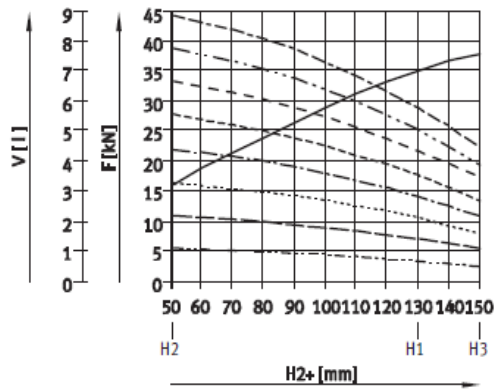
EB-215-80



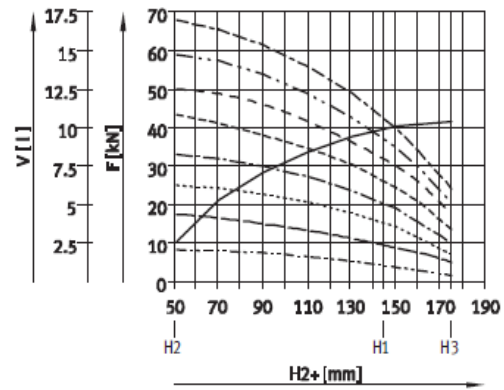
EB-250-85



EB-325-95



EB-385-115



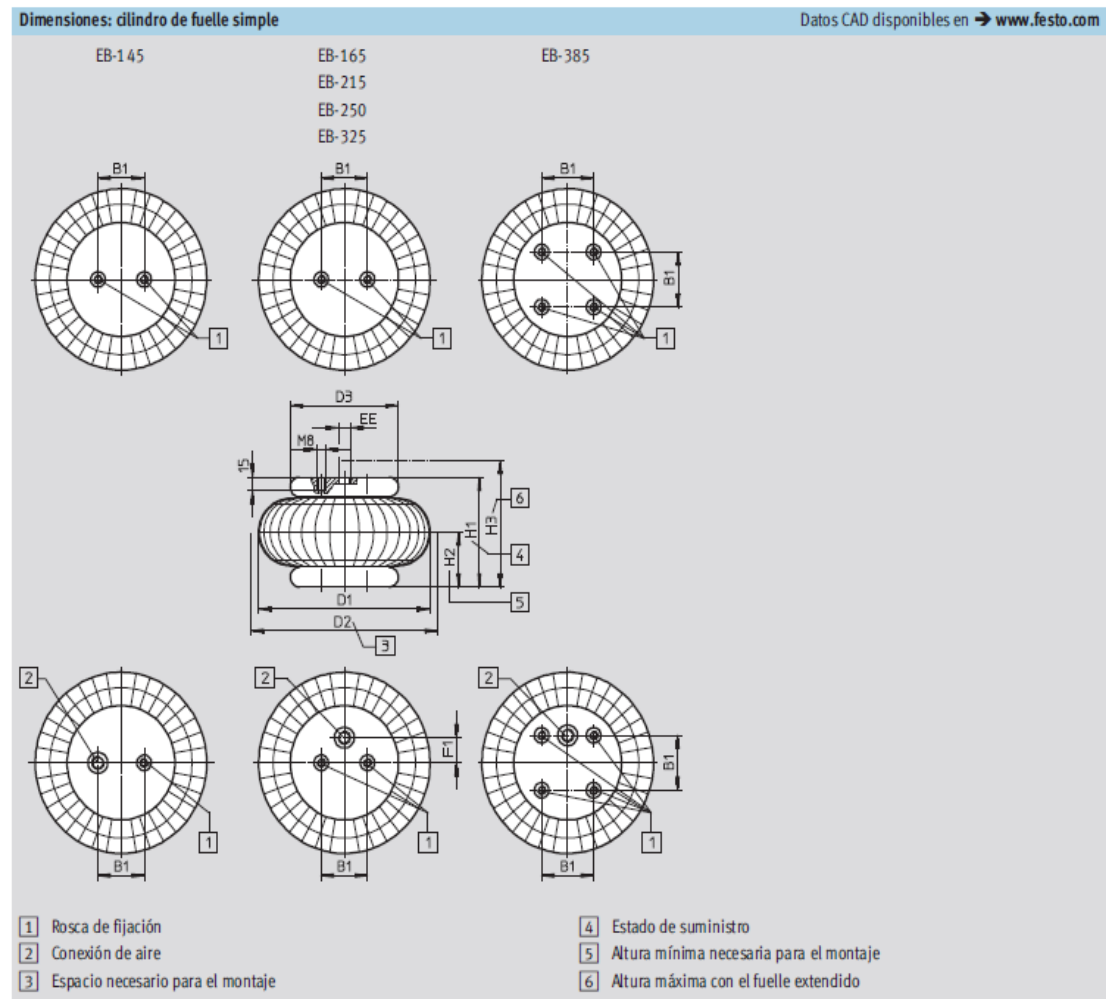
+ Añadir carrera

— Volumen  
 - - - 1 bar  
 - - - 2 bar  
 - - - 3 bar  
 - - - 4 bar  
 - - - 5 bar  
 - - - 6 bar  
 - - - 7 bar  
 - - - 8 bar

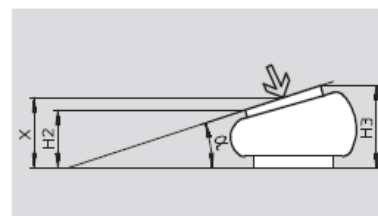
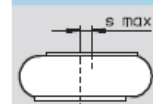
# Cilindros de fuelle EB

Hoja de datos

FESTO



## Desfase máximo entre las superficies de fijación



### Importante

Los cilindros de fuelle pueden ejecutar un movimiento a lo largo de un ángulo de inclinación. Deberá tenerse cuidado en no exceder dicho ángulo  $\alpha$ . Además, deberá ponerse cuidado en que los movimientos del cilindro

de fuelle nunca tengan una altura inferior a la altura mínima admisible H2 ni que superen la altura máxima H3. El centro X de la placa es el punto de referencia para calcular la fuerza de empuje necesaria.

## Cilindros de fuelle EB

Hoja de datos

**FESTO**

Tipo	B1 ±0,2	D1 Ø máx.	D2 Ø	D3 Ø	EE	F1 ±0,2	H1	H2 mín.	H3 máx.	s <sub>máx</sub>	Ángulo de giro α máx.
EB-145-60	20	145	160	90	G1/8	–	90	50	110	10	20°
EB-165-65	44,5	165	180	108	G1/4	0	90	51	115	10	20°
EB-215-80	70	215	230	141	G3/4	0	110	50	135	10	20°
EB-250-85	89	250	265	161	G3/4	38,1	110	51	140	10	20°
EB-325-95	157,5	325	340	228	G1/4	73	130	51	150	10	15°
EB-385-115	158,8	385	400	287	G1/4	79,4	145	51	175	10	15°

Referencias: cilindro de fuelle simple			
Tamaño	Carrera [mm]	Nº art.	Tipo
145	60	36 486	EB-145-60
165	65	36 487	EB-165-65
215	80	36 488	EB-215-80
250	85	36 489	EB-250-85
325	95	193 788	EB-325-95
385	115	193 789	EB-385-115

## ANEXO B – CATÁLOGO SMC

<b>Series ITV2000</b> Controls air pressure stoplessly in proportion to an electric signal. 	ITV201 □	0.005 to 0.1 MPa	1/4, 3/8
	ITV203 □	0.005 to 0.5 MPa	
	ITV205 □	0.005 to 0.9 MPa	

Sensitivity: **0.2 kPa** (100 kPa specifications) Equivalent to IP65

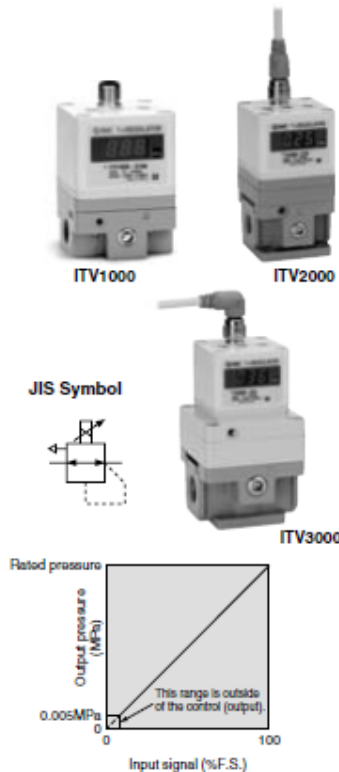
Linearity: Within  $\pm 1\%$  (F.S.)

Hysteresis: Within **0.5%** (F.S.)

# Electro-Pneumatic Regulator

## Series *ITV1000/2000/3000*

### Standard Specifications



Model	ITV101	ITV103	ITV105
	ITV201	ITV203	ITV205
	ITV301	ITV303	ITV305
Minimum supply pressure	Set pressure $\pm 0.1$ MPa		
Maximum supply pressure	0.2 MPa		
Set pressure range	0.005 to 0.1 MPa		
Power supply	24 VDC $\pm 10\%$ , 12 to 15 VDC		
Current consumption	Power supply voltage 24 VDC type: 0.12 A or less Power supply voltage 12 to 15 VDC type: 0.18 A or less		
Input signal	Current type: 4 to 20 mA, 0 to 20 mA (Sink type) Voltage type: 0 to 5 VDC, 0 to 10 VDC Preset input: 4 points		
Input Impedance	Current type: 250 $\Omega$ or less Voltage type: Approx. 6.5 k $\Omega$ Preset input: Approx. 2.7 k $\Omega$		
Output signal (monitor output)	Analog output: 1 to 5 VDC (Load impedance: 1 k $\Omega$ or more) 4 to 20 mA (Sink type) (Load impedance: 250 $\Omega$ or less) Output accuracy within $\pm 6\%$ (full span) Switch output: NPN open collector output: Max. 30 V, 30 mA PNP open collector output: Max. 30 mA		
Linearity	Within $\pm 1\%$ (full span)		
Hysteresis	Within 0.5% (full span)		
Repeatability	Within $\pm 0.5\%$ (full span)		
Sensitivity	Within 0.2% (full span)		
Temperature characteristics	Within $\pm 0.12\%$ (full span)/ $^{\circ}\text{C}$		
Output pressure display	Accuracy: $\pm 3\%$ (full span) Minimum unit: MPa: 0.01, kgf/cm $^2$ : 0.01, bar: 0.01, psi: 0.1, kPa: 1		
Ambient and fluid temperature	0 to 50 $^{\circ}\text{C}$ (No condensation)		
Enclosure	Equivalent to IP65		
Mass	ITV10: Approx. 250 g (without options) ITV20: Approx. 350 g (without options) ITV30: Approx. 645 g (without options)		

- Note 1) Please refer to graph 1, relation to the differences between the set pressure and input. Additionally, refer to page 668 as maximum set pressure differs on unit of standard measure.
- Note 2) 2-wire type 4 to 20 mA is not available. Power supply voltage (24 VDC or 12 to 15 VDC) is required.
- Note 3) Select either analog output or switch output.
- Note 4) Further, when switch output is selected, select either NPN output or PNP output.
- Note 5) Values can be adjusted starting from the minimum output pressure display units (ex. 0.01 to 0.50 MPa) are used for the zero/span adjustment or the preset input type adjustment. Units are not interchangeable.
- Note 6) The minimum unit for the 0.9 MPa (130 psi) type is 1 psi.
- Note 7) The above characteristics are confined to the static state. When air is consumed on the output side, the pressure may fluctuate.

### How to Order

ITV 3 0 1 0 - 0 1 2 S - - -										
<b>Model</b>		<b>Pressure range</b>		<b>Input signal</b>		<b>Pressure display unit</b>		<b>CE compliance</b>		
1	1000 type	1	0.1 MPa	0	Current 4 to 20 mA (Sink type)	Nil	MPa	Nil	Not compliant	
2	2000 type	3	0.5 MPa	1	Current 0 to 20 mA (Sink type)	2 <sup>(Nil)</sup>	kgf/cm <sup>2</sup>	Q	Compliant	
3	3000 type	5	0.9 MPa	2	Voltage 0 to 5 VDC	3 <sup>(Nil)</sup>	bar	* Please visit our SMC homepage: <a href="http://www.smccworld.com">http://www.smccworld.com</a> for the latest details on our CE compliant products.		
<b>Power supply voltage</b>		<b>Monitor output</b>		<b>Thread type</b>		<b>Cable connector type</b>				<b>Made to Order</b> Refer to pages 663, 664 and 665 for details.
0	24 VDC	0*	None (for preset input)	Nil	Rc	S	Straight type 3 m			
1	12 to 15 VDC	1	Analog output 1 to 5V DC	N	NPT	L	Right angle type 3 m			
		2*	Switch output/NPN output	T	NPTF	N	Without cable connector			
		3*	Switch output/PNP output	F	G					
		4*	Analog output 4 to 20 mA (Sink type)							
						</				

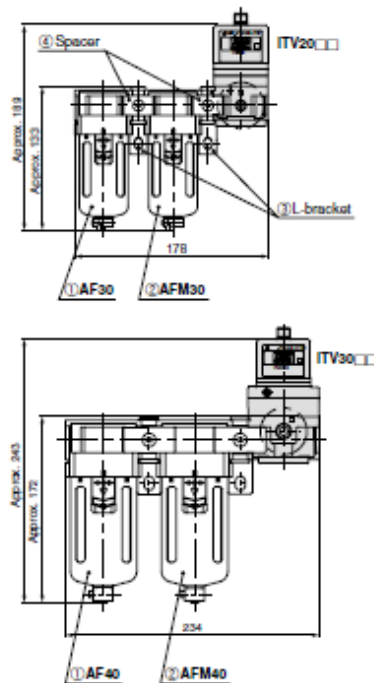
Nil	Not compliant
O	Compliant

Note) Refer to pages 663, 664 and 665 for CE marked products in the Made to Order specifications.

\* Please visit our SMC homepage: <http://www.smccworld.com> for the latest details on our CE compliant products.

**Made to Order**  
Refer to pages 663, 664 and 665 for details.

# Electro-Pneumatic Regulator *Series ITV1000/2000/3000*



## Combinations

○ Standard specifications  
○ Combination possible  
□ Combination not possible

\* ITV10□□ models are not applicable.

Specifications		Symbol	Applicable model	
			ITV20□□	ITV30□□
Standard specifications	Set pressure max. 0.1 MPa	1	○	○
	Set pressure max. 0.5 MPa	3	○	○
	Set pressure max. 0.9 MPa	5	○	○
	Connection Rc 1/4	02	○	○
	Connection Rc 3/8	03	○	○
	Connection Rc 1/2	04	□	○
Accessories	Bracket	B	○	○
	Bracket	C	○	○
Optional specifications	Connection NPT1/4	N02	○	○
	Connection NPT3/8	N03	○	○
	Connection NPT1/2	N04	□	○
	Connection G 1/4	F02	○	○
	Connection G 3/8	F03	○	○
	Connection G 1/2	F04	□	○

## Modular Products and Accessory Combinations

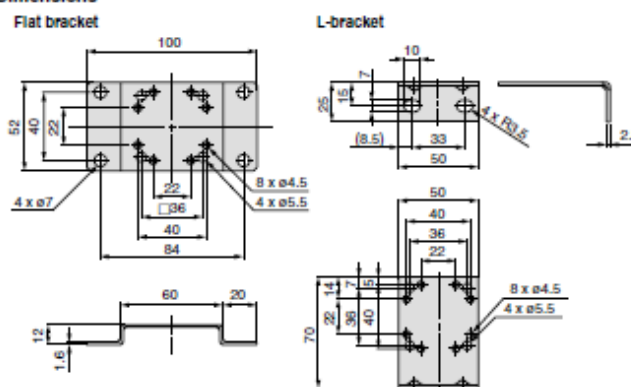
\* ITV10□□ models are not applicable.

Applicable products and accessories	Applicable model	
	ITV20□□	ITV30□□
① Air filter	AF30	AF40
② Mist separator	AFM30	AFM40
③ L-bracket	B310L	B410L
④ Spacer	Y30	Y40
⑤ Spacer with L-bracket (③ + ④)	Y30L	Y40L

## Accessory (Option)/Part No.

Description	Part No.		
	ITV10□□	ITV20□□	ITV30□□
Flat bracket	P3020114 (Mounting thread is not included.)		
L-bracket	INI-398-0-6 (Mounting thread is not included.)		
Cable connector	Straight type 3 m	P398020-500-3	
	Right angle type 3 m	P398020-501-3	

## Dimensions



Made to Order (Refer to pages 664 and 665 for details.)		
Symbol	Compliant	Specifications
X80	Not compliant	DeviceNet compliant
X155	Compliant	
X300	Not compliant	CC-Link compliant
X305	Compliant	
X310	Not compliant	RS-232C compliant
—	Compliant	
X81	Not compliant	16 points preset input type
X156	Compliant	
X93	Not compliant	Digital input type
X157	Compliant	
X102	Not compliant	Reverse type
X321	Compliant	
X224	Not compliant	High pressure type (SUP 1.2 MPa, OUT 1.0 MPa)
X322	Compliant	
X25	Not compliant	Set pressure range 1 to 100 kPa (Except Series ITV3000)
X323	Compliant	
X88	Not compliant	High speed response type (Except Series ITV3000)
X154	Compliant	
X26	Not compliant	For manifold mounting (Except Series ITV3000)
X153	Compliant	

Note 1) Manifolds are compatible with 2 to 8 stations.  
Consult with SMC for 9 stations or more.

Note 2) Products without symbols are also compatible.  
Consult with SMC separately.

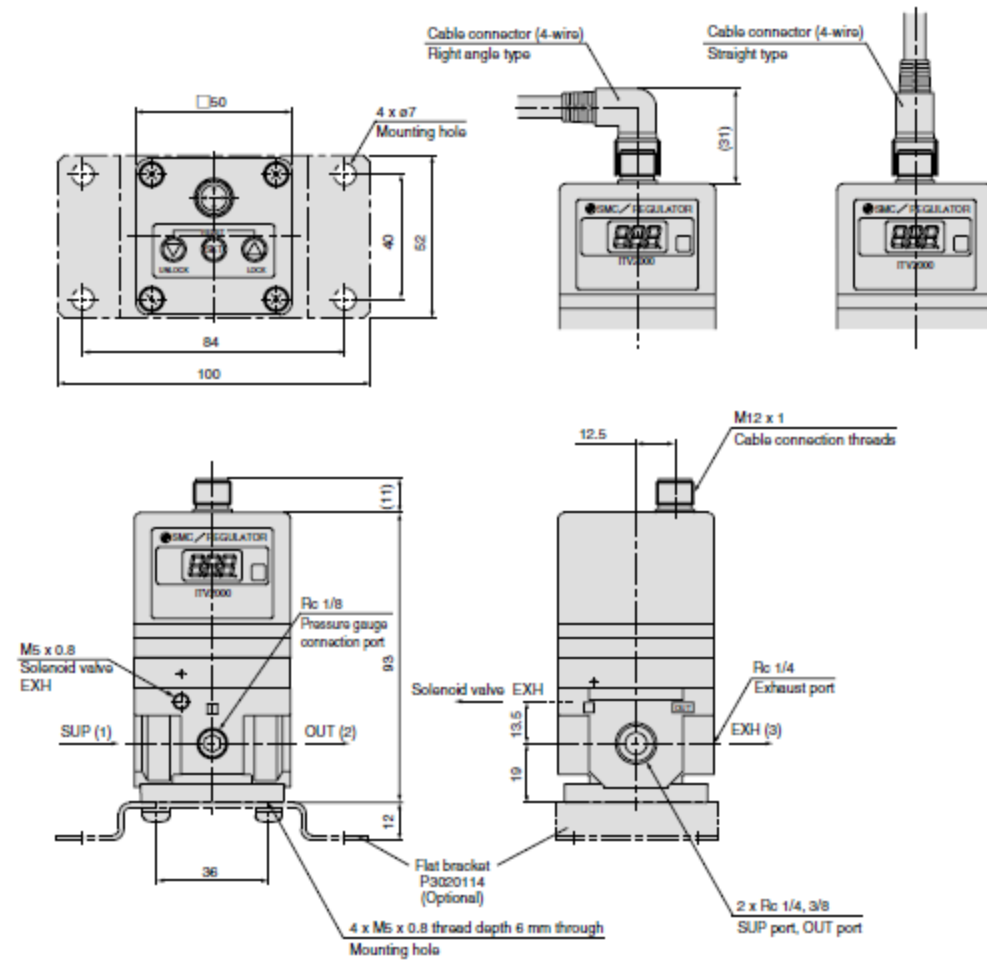


## Dimensions

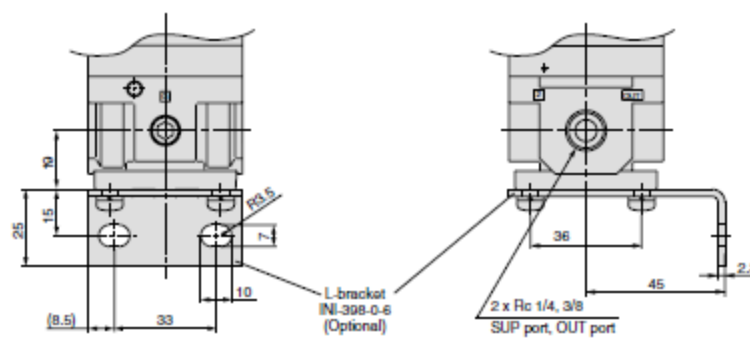
### ITV20□□

#### Flat bracket


Note) Do not attempt to rotate, as the cable connector does not turn.




















#### L-bracket



## ANEXO C – CUSTO DO EQUIPAMENTO

Componente	Dimensões	Características	Fabricante	Imagem	Preço
<b>Sistema de aplicação de carga</b>					
Cilindro de membrana de simples efeito	D=250mm		Festo		313,79€
Regulador/controlador proporcional		- Alcance de pressão de 0,005 a 0,9MPa	SMC		537,51€
Interface model 3200 standard stainless steel, com base de montagem opcional incluída					1060,26€
Interface model SGA amplifier/conditioner					376,38€
<b>Total</b>					<b>2287,94€</b>
<b>Estrutura</b>					
Apoio engana		30 – 100 kg	ELAX		39,10€
Discos de rebarbar	115 x 6.0		ELAX		7,96€
Discos de corte	115 x 1	Inox	ELAX		6,64€
Discos lamelado	115 P080		ELAX		4,88€

Electrodo arco numal	350 x 2,5 mm		ELAX		20,65€
<i>Spray vmd 49 Zinco Brilhante</i>			ELAX		8,60€
Parafusos umb.c/cil.D. 912	M08 x 090 12.9		ELAX		1,36€
Parafusos umb.c/cil.D 912	M08 x 030 12.9		ELAX		0,47€
Anilha chapa 9021 A/Larg	M08	Inox A2	ELAX		0,30€
Femea sext.D.934	8.8 M16		ELAX		0,12€
Disco <i>PFERD Strip PCLD</i>	115-13	Retira tinta e Ferrugem	ELAX		25,66€
Removedor de ferrugem	2L	Remover ferrugem	ELAX		19,24€
Zarcão (primário)	0,75L	Cor Primária	ELAX		9,89€

Tinta	0,75l	Azul acinzentado	ELAX		15,50€
Diluyente celuloso chapa	5L		ELAX		17,82€
Luva preta			ELAX		2,35€
Máscara 1 filtro			ELAX		16,20€
Trincha	80 mm		ELAX		5,58€
Rolo	100 mm		ELAX		2,32€
Trincha pequena			ELAX		1,46€
<b>Total</b>					<b>206,10€</b>
<b>+ 23% IVA</b>					<b>253,50€</b>
<b>Montagem do sistema de controlo</b>					
Tubo branco	15 m	10/8	ELAX		18,90€


<i>Raccord</i> de ligação rápida ¼ fêmea para tubo de 10mm		10 1/4	ELAX		1,86€
União <i>raccord</i> de ligação rápida 3/8 macho para tubo de 10mm		10 3/8	ELAX		3,14€
União <i>raccord</i> de ligação rápida ½ macho para tubo de 10mm		10 1/2	ELAX		2,10€
Redução ¾ macho para ½ fêmea		3/4 1/2	ELAX		2,08€
Ponta de ligação rápida ¼ macho		1/4	ELAX		1,70€
Anilha chapa	M08		ELAX		0,12€
Parafuso sextavado	M08x110		ELAX		0,69€
Parafuso sextavado	M08x120		ELAX		0,88€
Rolo de fita teflon	12x12		ELAX		0,28€
<b>Total</b>					<b>31,75€</b>
<b>+ 23% IVA</b>					<b>39,05€</b>


No total em acessórios e equipamento adquirido houve um gasto de **2580,49€**, uma vez que , não houve gasto para a conceção da estrutura pois o ferro utilizado já existia nas oficinas de formação e apoio do departamento de engenharia mecânica.

Equipamentos já existentes no Dem que irão ser utilizados neste equipamento:

- ***NATIONAL INSTRUMENTS NI DAQPad-6015 (16 inputs, 200kS/s, 16 bit Multifunction I/O for USB) - Placa de aquisição de dados;***
- ***NATIONAL INSTRUMENTS Software LabVIEW 8.6;***
- ***ASUS Laptop Asus A7J (Core Duo T2400 Processor 1.83GHz, 2GB RAM) com sistema operativo Windows XP.***

## ANEXO D - CALIBRAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA





## LOAD CELL CALIBRATION CERTIFICATION

CONDITION: FINAL  
 MODEL: 3211BRE-5K-B SERIAL: 313571 BRIDGE: A CAPACITY: 5 Ktbf  
 PROCEDURE: C-1257 Mounting Per Interface Installation Instruction 15-5

INPUT RESISTANCE: 351.2 OHM OUTPUT RESISTANCE: 351.2 OHM  
 ZERO BALANCE: -0.185 OHM

### TEST CONDITIONS

TEMPERATURE: 75 °F HUMIDITY: 35 % EXCITATION: 10 VDC

### TRACEABILITY

FORCE STANDARD: STD-22 NIST #: 681/281224-11 DUE: 15-SEP-15  
 STANDARD INDICATOR: BRD106 NIST #: 608380  
 TEST INDICATOR: BRD300 NIST #: 608380

### SHUNT CALIBRATION

	Shunt (± 0.01%)	Output	Straight Line Conversion	Connections*
Tension	Kohm	.00000 mV/V	.0000 Ktbf	
Compression	30 Kohm	-2.90089 mV/V	3.3522 Ktbf	-Out to +Exc

\*For models wired with +Exc, -Sense, or -Sd1 leads, resistor connections are identical to those shown in place of +Exc, -Exc, or -Out respectively.


### PERFORMANCE

	RATED OUTPUT	SEB OUTPUT	NONLINEARITY	HYSTERESIS	SEB
TENSION	.00000 mV/V	.00000 mV/V	.000 %FS	.000 %FS	± .000 %FS
COMPRESSION	-4.32786 mV/V	-4.32686 mV/V	-.033 %FS	.040 %FS	± .023 %FS

STATIC BRIDGE SENSITIVITY: The limit of maximum deviation of the ascending and descending calibration points from a best fit straight line through zero output. It includes the effects of NONLINEARITY, HYSTERESIS, and NONZERO TO MINIMUM LOAD.

TEST LOAD APPLIED (Ktbf)	RECORDED READINGS (mV/V)	
	Tension	Compression
0		.00000
1		-.86451
2		-1.72973
3		-2.59541
4		-3.46144
5		-4.32786
6		-1.73145
0		.00012

Interface, Inc. certifies that all calibration measurements are traceable to NIST. Estimated uncertainty of measurements is 0.048%. Results relate to 313571 only. Do not reproduce this report except in full or with Interface written approval.

TECHNICIAN:  Chuck Feder DATE: 02-DEC-11

INTERFACE INC.  
 7401 EAST BUTHERUS DRIVE - SCOTTSDALE, ARIZONA 85260, U.S.A.  
 TELEPHONE (480)948-5555 - FAX (480)948-1924

FIS-30-0418
PAGE 1 OF 1